



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE INGENIERÍA
INSTITUTO DE INGENIERÍA

UNAM
POSGRADO
Ingeniería



PROGRAMA ÚNICO DE ESPECIALIZACIONES DE INGENIERÍA
CAMPO DE CONOCIMIENTO: INGENIERÍA CIVIL

**ESTADO DEL ARTE SOBRE LA APLICACIÓN DEL EFECTO
FOTOCATALÍTICO DE TiO_2 EN LA DESINFECCIÓN DE
AGUA**

T E S I N A

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
ESPECIALISTA EN INGENIERÍA SANITARIA

P R E S E N T A:

ING. GUADALUPE BELLO LÓPEZ



DIRECTOR DE TESINA: **DRA. ALMA C. CHÁVEZ MEJÍA**
COTUTOR: **DR. RAFAEL MAGAÑA LÓPEZ**

CIUDAD UNIVERSITARIA, CDMX

OCTUBRE 2021



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA ÚNICO DE ESPECIALIZACIONES DE INGENIERÍA

DR. ARMANDO ORTIZ PRADO
Coordinador del Programa
Presente

Por este medio comunico a usted que he leído la tesina titulada: "ESTADO DEL ARTE SOBRE LA APLICACIÓN DEL EFECTO FOTOCATALÍTICO DE TiO_2 EN LA DESINFECCIÓN DE AGUA" para obtener el grado de ESPECIALISTA EN INGENIERÍA SANITARIA plan 11-3158, que presenta la alumna GUADALUPE BELLO LÓPEZ.

Considero que la mencionada tesina ^{Si} es satisfactoria, por lo que ^{Si} la apruebo sin otorgarle créditos académicos.

Quedo enterado de que formaré parte del jurado en la fecha y hora que se me comunicará posteriormente.

Atentamente,

DR. ENRIQUE CÉSAR VALDEZ

BJS

Fecha: 17-11-2021



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA ÚNICO DE ESPECIALIZACIONES DE INGENIERÍA

DR. ARMANDO ORTIZ PRADO
Coordinador del Programa
Presente

Por este medio comunico a usted que he leído la tesina titulada: "ESTADO DEL ARTE SOBRE LA APLICACIÓN DEL EFECTO FOTOCATALÍTICO DE TiO_2 EN LA DESINFECCIÓN DE AGUA" para obtener el grado de ESPECIALISTA EN INGENIERÍA SANITARIA plan 11-3158, que presenta la alumna GUADALUPE BELLO LÓPEZ.

Considero que la mencionada tesina SI es satisfactoria, por lo que SI la apruebo sin otorgarle créditos académicos.

Quedo enterado de que formaré parte del jurado en la fecha y hora que se me comunicará posteriormente.

Atentamente,

DRA. ALMA CONCEPCIÓN CHÁVEZ MEJÍA

BJS

Fecha: 16/NOV/2021



UNIVERSIDAD NACIONAL
AVENIDA DE
MEXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA ÚNICO DE ESPECIALIZACIONES DE INGENIERÍA

DR. ARMANDO ORTIZ PRADO
Coordinador del Programa
Presente

Por este medio comunico a usted que he leído la tesina titulada: "ESTADO DEL ARTE SOBRE LA APLICACIÓN DEL EFECTO FOTOCATALÍTICO DE TiO₂ EN LA DESINFECCIÓN DE AGUA" para obtener el grado de ESPECIALISTA EN INGENIERÍA SANITARIA plan 11-3158, que presenta la alumna GUADALUPE BELLO LÓPEZ.

Considero que la mencionada tesina sí es satisfactoria, por lo que sí la apruebo sin otorgarle créditos académicos.

Quedo enterado de que formaré parte del jurado en la fecha y hora que se me comunicará posteriormente.

Atentamente,

M.I. CRISTIAN EMMANUEL GONZÁLEZ REYES

BJS

Fecha: 16/11/2021



UNIVERSIDAD NACIONAL
AVENIDA DE
MEXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA ÚNICO DE ESPECIALIZACIONES DE INGENIERÍA

DR. ARMANDO ORTIZ PRADO
Coordinador del Programa
Presente

Por este medio comunico a usted que he leído la tesina titulada: "ESTADO DEL ARTE SOBRE LA APLICACIÓN DEL EFECTO FOTOCATALÍTICO DE TiO_2 EN LA DESINFECCIÓN DE AGUA" para obtener el grado de ESPECIALISTA EN INGENIERÍA SANITARIA plan 11-3158, que presenta la alumna GUADALUPE BELLO LÓPEZ.

Considero que la mencionada tesina sí es satisfactoria, por lo que sí la apruebo sin otorgarle créditos académicos.

Quedo enterado de que formaré parte del jurado en la fecha y hora que se me comunicará posteriormente.

Atentamente,

DR. LUIS ANTONIO GARCÍA VILLANUEVA

BJS

Fecha: 16 de noviembre de 2021



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA ÚNICO DE ESPECIALIZACIONES DE INGENIERÍA

DR. ARMANDO ORTIZ PRADO
Coordinador del Programa
Presente

Por este medio comunico a usted que he leído la tesina titulada: "ESTADO DEL ARTE SOBRE LA APLICACIÓN DEL EFECTO FOTOCATALÍTICO DE TiO₂ EN LA DESINFECCIÓN DE AGUA" para obtener el grado de ESPECIALISTA EN INGENIERÍA SANITARIA plan 11-3158, que presenta la alumna GUADALUPE BELLO LÓPEZ.

Considero que la mencionada tesina SI es satisfactoria, por lo que SI la apruebo sin otorgarle créditos académicos.

Quedo enterado de que formaré parte del jurado en la fecha y hora que se me comunicará posteriormente.

Atentamente,

M.I.  JOSÉ LUIS SÁNCHEZ GALARZA

BJS

Fecha: 17/11/2021

Agradecimientos

En primer lugar, quiero agradecer a mi tutora Dra. Alma Chávez Mejía del Instituto de Ingeniería – UNAM quien, con sus conocimientos y apoyo me guio a través de cada una de las etapas de este proyecto para alcanzar los resultados que buscaba. También quiero agradecer al Dr. Rafael Magaña López y a la M. I. Paloma Isabel Zaragoza Sánchez por sus valiosos consejos que fueron necesarios para llevar a cabo el proceso de investigación.

Agradezco al Programa Único de Especializaciones de Ingeniería (PUEI) de la Facultad de Ingeniería por darme la oportunidad de pertenecer a su distinguida comunidad y felicito al profesorado por la entrega, dedicación y esfuerzo para brindar una formación de calidad a sus alumnos.

Mi sincero agradecimiento a la SECTEI y al proyecto con número de convenio 9216c19 de “Mejoramiento de los procesos de potabilización y tratamiento de agua residual y uso de tecnologías descentralizadas en los 21 proyectos de regulación como estrategia auxiliar para el aseguramiento hídrico del Río Magdalena con número de convenio 9216c19, SECTEI/260/2019” por las facilidades otorgadas.

Dedico esta tesina la memoria de mi hermana Susana Solano López, quién siempre me animó en mis estudios y durante varios años me dio palabras de apoyo. La fuerza y la fe de Sussy me guiaron a una nueva apreciación del significado y la importancia de la familia

¡Te extraño!

*A mi esposo Alfonso,
A mis hijas, Andrea y Rebeca
A mi hijo Alfonso "Mike"
¡Los amo!*

Análisis documental sobre la aplicación del efecto fotocatalítico de TiO₂ en la desinfección de aguas.

CONTENIDO

CONTENIDO	10
Índice de Tablas	12
Índice de Figuras	13
Índice de Abreviaturas	14
1. RESUMEN	16
2. INTRODUCCIÓN	18
3. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN	21
3.1 General	21
3.2 Específicos	21
4. JUSTIFICACIÓN, ALCANCES Y LIMITACIONES	21
4.1 Justificación	21
4.2 Alcances	23
4.3 Limitaciones	23
4.4 Definición de las preguntas a resolver	24
5. MARCO DE REFERENCIA	24
5.1 Contaminantes biológicos del agua y riesgos a la salud	24
5.1.1 Virus	29
5.1.2 Bacterias	32
5.1.3 Protozoarios	35
5.1.4 Helmintos	36
5.1.5 Enfermedades emergentes	37
5.1.6 Indicadores microbiológicos de la calidad del agua	39
5.1.7 Contaminación y la agenda 2030 de la ONU	41
5.2 Desinfección convencional de agua	43
5.2.1 Factores que influyen en la desinfección	44
5.2.2 Medios físicos	48
5.2.3 Medios químicos	48
5.2.4 Uso de metales como desinfectantes	49
5.3 Procesos de oxidación avanzada en desinfección	52
5.3.1 Desinfección con Ozono	52
5.3.2 Desinfección con Radiación UV	54
5.3.3 Desinfección con Fotocatálisis heterogénea empleando TiO ₂	56
5.4 Mecanismos de acción de los desinfectantes	62
5.5 Cinética de la desinfección	62
6. METODOLOGÍA	67
6.1 Identificación	68
6.2 Proyección	69
6.3 Elegibilidad	69
6.4 Incluidos Cualitativos	70

6.5 Incluidos Meta-análisis	70
7. DISCUSIÓN DE RESULTADOS	72
7.1 Síntesis/ Obtención del TiO ₂	74
7.2 Microorganismos empleados en ensayos de desinfección fotocatalítica	76
7.3 Condiciones operativas de la desinfección fotocatalítica del agua	82
7.4 Carga del fotocatalizador	86
7.5 Concentración inicial del microorganismo	88
7.6 Fuente lumínica	88
7.7 Matriz de agua	89
7.8 Mecanismos de acción	90
7.8.1 Virus	90
7.8.2 Bacterias	90
7.9 Eficiencia de inactivación	91
7.10 Modelos cinéticos reportados	92
7.11 Ventajas e inconvenientes	94
8. CONCLUSIONES	96
ANEXO	98
REFERENCIAS	126

Índice de Tablas

Tabla 5.1 Enfermedades transmitidas por el agua (ETA).	26
Tabla 5.2 Enfermedades emergentes, reemergentes y los factores de riesgo relacionados.	38
Tabla 5.3 Objetivos de Desarrollo Sostenible relacionados con la calidad del agua	42
Tabla 5.4 Características deseables en un desinfectante	46
Tabla 5.5 Proceso de ozonización en desinfección	53
Tabla 5.6 Uso de luz UV en desinfección.	55
Tabla 5.7 Modelos cinéticos empleados en desinfección.....	65
Tabla 7.1. Resultados del meta-análisis documental sobre la aplicación del efecto fotocatalítico de TiO ₂ en la desinfección de agua en la década 2010 - 2020.	99
Tabla 7.2 Elementos comúnmente usados en dopaje de TiO ₂ para..... desinfección fotocatalítica	75 75
Tabla 7.3 Microorganismos empleados en ensayos de desinfección fotocatalítica	80
Tabla 7.4 Parámetros operacionales a controlar en	85
desinfección fotocatalítica con TiO ₂ (Elaboración propia)	85
Tabla 7.5 Soporte para fijación del fotocatalizador TiO ₂	87

Índice de Figuras

Figura 5.2 Mecanismo de la fotocatalisis heterogénea empleando TiO_2	57
Figura 5.3 Desinfección fotocatalítica con nano partículas de TiO_2	59
Figura 5.4 Proceso de desinfección fotocatalítica con nano partículas de TiO_2 y ERO fotogeneradas	61
Figura 4.1 Curvas de inactivación típicas	64
Figura 6.1 Diagrama de flujo que representa las fases de la investigación basada en el modelo Cochrane (2021),	68
Figura 7.1 Imagen TEM que muestra la morfología de la superficie de células <i>A.</i> <i>tumefaciens</i> en varias etapas de tratamiento con 1 mg de TiO_2 en una película delgada durante 30 min de irradiación UV	77
Figura 7.2 Microfotografía electrónica de barrido de <i>E. coli</i> , <i>L. monocytogenes</i> y <i>Salmonella typhimurium</i> tratadas en una reacción de oxidación fotocatalítica con TiO_2 asistida por UV	78
Figura 7.3 Imagen SEM de ooquiste de <i>Cryptosporidium parvum</i> (a) sin tratamiento y (b) cáscara vacía del ooquistos después del tratamiento fotocatalítico.....	79
Figura 7.4 Dependencia de la cinética de inactivación bacteriana de la dosis de irradiación solar simulada aplicada sobre una muestra que contiene nanotubos de TiO_2 - Ag3%- FeOx3%	89
Figura 7.5 Inactivación fotocatalítica de (a) <i>Enterococcus sp.</i> , (B) <i>S. aureus</i> , (c) <i>E. coli</i> y (d) <i>Salmonella</i>	93
Figura 7.6 Inactivación de <i>E. coli</i> en muestras de agua dulce superficial con 1 g/L de TiO_2 e irradiación UV-Vis. Se puede observar claramente las tres zonas de “hombro”, log lineal y “cola” del modelo de Hom modificado	94

Índice de Abreviaturas

ADN	Ácido desoxirribonucleico
ARN	Ácido ribonucleico
BC	Banda de conducción
BRA	Bacterias Resistentes a Antibióticos
BV	Banda de Valencia
CEPAL	Comisión Económica para América Latina y el Caribe
CFU	Unidades formadoras de colonias (bacterias)
CNDH	Comisión nacional de los derechos humanos
CONAGUA	Comisión nacional del agua
CPC	Colector cilindro-parabólico
CYN	Cilindropermopsina
DOF	Diario Oficial de la Federación
EOH	Enfermedades de origen hídrico
ERO	Especies reactivas de oxígeno
GRA	Genes de Resistencia a Antimicrobianos
HAA	Ácido trihaloacéticos
HGT	Transferencia horizontal de genes
HH	Huevos de Helminetos
HPeV	Parechovirus humano
HPLC	Cromatografía líquida de alta eficacia
HuNoV	Norovirus humano
LED	Luz emitida por diodos
LMP	Límite máximo permisible
MC	Microcistina
ND	Datos no disponibles
NMP	Número más probable (bacterias)
NMP	Número más probable
NOM	Norma Oficial Mexicana
ODM	Objetivos de Desarrollo del Milenio
ODS	Objetivos de Desarrollo Sostenible
OMS	Organización Mundial de la Salud
ONU	Organización de las Naciones Unidas
PP	Plantas potabilizadoras
PBS	Solución salina tampón fosfato
PFU	Unidades formadoras de placa
POA	Procesos de oxidación avanzada.
PROY	Proyecto
PTARM	Plantas de tratamiento de aguas residuales municipales
RAM	Mecanismo de Resistencia a Antimicrobianos
SEM	Microscopio electrónico de barrido
SEMARNAT	Secretaría de marina y recursos naturales
SSA	Secretaría de Salud
TEM	Microscopía electrónica de transmisión
THM	Trihalometanos.

UFC	Unidades formadoras de colonias
UNESCO	Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura
USEPA	Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos
UV	Ultra violeta
UVA	Radiación ultra violeta (315 a 400 nm)
UVB	Radiación ultra violeta (280-315 nm)
UVC	Radiación ultra violeta (100-280 nm)
UV-Vis	Espectro visible (400-700 nm)
VT	Volumen total

1. RESUMEN

La Organización de las Naciones Unidas promueve que el agua sea considerada como un bien económico y un bien social, por ser fundamental tanto para el desarrollo socioeconómico de las naciones, la salud de los ecosistemas y para la propia supervivencia humana. La adecuada gestión del agua implica ejercer responsabilidades y conocimientos transversales que involucran a autoridades, empresas y la población en general. Es preciso hacer conciencia sobre las reservas de este líquido vital y las consecuencias que tiene un saneamiento deficiente sobre los ecosistemas, ya que, la contaminación de los cuerpos de agua superficiales reduce inmediatamente su disponibilidad y su potencial uso o reúso. Algunos grupos de organismos, tal como virus, bacterias, protozoarios y hongos pueden encontrarse contaminando este recurso al ser trasladados a diversos lugares y ser principal vehículo de exposición humana a los peligros microbiológicos, ya sea como bebida, en actividades recreativas, en el riego de alimentos o en cualquier otro tipo de contacto. Los padecimientos derivados de sus infecciones constituyen un riesgo de salud pública. Por esta razón, la desinfección del agua es imprescindible en cualquier sistema de potabilización al ser el único proceso con fines de control biológico, así como de ser el paso final en el saneamiento de aguas residuales previas a su vertimiento.

A pesar de que han transcurrido 194 años desde la creación del primer sistema de potabilización conformado por un filtro (Lenntech, 2021b), aunado con que en la actualidad se cuentan con productos químicos disponibles que eliminan los agentes patógenos del agua, no ha sido posible encontrar un método ideal de desinfección. La transformación de los biomas que ha fomentado el ser humano sobre la superficie terrestre, ha derivado en que los residuos generados por la vida cotidiana llegan a cuerpos de agua superficial, propiciando interferencias con los procesos naturales de renovación y modificando riesgosamente el comportamiento de las dinámicas ecosistémicas. Existe evidencia científica de que ciertas bacterias han logrado desarrollar tolerancia a los productos usados comúnmente en desinfección con las dosis recomendadas, ello, derivado de la frecuente interacción que llevan a cabo dentro de las plantas de tratamiento o en los cuerpos de agua donde se descargan las aguas tratadas. Incrementar la dosis recomendada, tampoco constituye una solución viable, pues los productos empleados generan subproductos que han sido relacionados como precursores y detonantes de diversos tipos de cáncer cuando se consumen de forma prolongada. Si bien, los procesos de oxidación avanzada usados actualmente logran desinfectar el agua y degradar una variedad de contaminantes persistentes, los costos en su mantenimiento hacen que a la fecha sea poco frecuente su utilización, no obstante, resulta una opción prometedora para ser explotada. Por ello, la desinfección fotocatalítica con TiO_2 posee un poder sobre una amplia gama de los grupos de interés sanitario. Su mecanismo de acción resulta de la generación de especies reactivas de oxígeno que, por otra parte, también permiten degradar un amplio abanico de contaminantes, ambos hasta su mineralización sin cambiar las propiedades organolépticas del agua y sin generar subproductos potencialmente riesgosos, lo cual reafirma la validez del agente en cuanto a su estudio. De esta manera, los temas abordados en esta investigación conjunta los datos experimentales sobre el uso del

efecto fotocatalítico del TiO_2 aplicado a la desinfección de agua en diversas matrices ambientales, realizados en la última década al emplear un meta-análisis documental de 67 artículos que permitieron establecer el estado del arte en ensayos de desinfección con siete tipos de virus (enterovirus), 29 especies de bacterias (enterobacterias antropogénicas y no antropogénicas incluyendo las cianobacterias y sus cianotoxinas generadas), tres tipos de hongos y los ooquistos del protozoo *Cryptosporidium parvum*, encontrándose que el organismo más empleado en los ensayos de desinfección, es *E. coli*. En la realización de ensayos de desinfección, la obtención del fotocatalizador directa del fabricante resultó ser la forma más común de obtención, seguida de la síntesis por el método sol gel, dopaje con Ag, Cu, Al y la calcinación se utilizan para definir la estructura cristalina del fotocatalizador y favorecer el efecto fotocatalítico. La concentración inicial del microorganismo y la del fotocatalizador son las condiciones operativas de mayor impacto en el proceso fotocatalítico, seguido de la intensidad, el tiempo y tipo de irradiación UV con una tendencia alcista en el uso de luz LED. Se encontró, además, que la desinfección fotocatalítica puede seguir dos mecanismos de acuerdo al tamaño de la partícula del fotocatalizador: Adsorción y oxidoreducción cuando la partícula de TiO_2 es mayor al tamaño del microorganismo, e invasión al interior de la célula y oxidoreducción si el tamaño de partícula es menor al microorganismo y el fotocatalizador puede permear la pared celular. El comportamiento de la desinfección fotocatalítica con TiO_2 sigue el modelo Chick-Watson a concentraciones iguales o menores de $1\text{E}05$ UFC y el modelo de Hom modificado para concentraciones mayores o con microorganismos cuyas membranas sean gruesas como en el caso del oooquisto de *Cryptosporidium* sp. La aplicación del efecto fotocatalítico del TiO_2 se muestra como una alternativa prometedora con fines de desinfección por ser capaz de eliminar un amplio espectro de organismos de interés sanitario, lo cual es una ventaja a considerar. Sin embargo, entre los inconvenientes se puede incluir que esta tecnología aún se encuentra en una etapa básica de investigación, por lo que aún representa un alto costo comparado con las técnicas en uso y la incertidumbre en los resultados que se relacionan con la conformación del fotorreactor durante su aplicación. No obstante, a futuro puede ser capaz de brindar agua segura para uso y consumo humano, aumentar la eficiencia de desinfección en una PTAR y contribuir a la seguridad hídrica de aguas superficiales que reciben aguas residuales tratadas.

2. INTRODUCCIÓN

La desinfección del agua es imprescindible para proteger la salud pública contra numerosos agentes patógenos, por ello, es prioridad en cualquier sistema de potabilización, y en algunas ocasiones es, al mismo tiempo, la única etapa y paso final en el proceso de tratamiento de agua residual municipal. En términos generales, los riesgos microbiológicos son preocupantes, y en particular aquellos derivados del consumo de agua contaminada con excretas humanas o de animales, los cuales son fuentes de organismos patógenos propios de humanos y zoonóticos, tales como virus, bacterias, protozoos y helmintos (OMS, 2018). Los padecimientos derivados de infecciones bacterianas constituyen un riesgo de salud pública que ha sido remediado mediante la eliminación, inactivación o destrucción de los microorganismos patógenos que existen en ella. No obstante, lo anterior no ha sido logrado en su totalidad para el abanico de organismos que conforman la problemática de salud, a pesar de emplear medios físicos o químicos, o bien, la combinación de ellos. Por este motivo, es importante explorar las diversas alternativas en desinfección que ya han sido evaluadas (Magaña et al., 2021; Malato et al., 2007; Doménech, 2004)

Si bien, el uso generalizado del cloro y sus derivados con fines de desinfección son utilizados ampliamente debido a su bajo costo en comparación con otros agentes y métodos, así como por su efecto residual, el cual no ha sido logrado por ningún otro agente desinfectante con tal eficiencia. Su uso frecuente, a pesar de que su obtención, manejo y almacenamiento en altas concentraciones representa un peligro para las zonas circundantes a la aplicación por requerir medidas adicionales de seguridad debido a su naturaleza tóxica, reactiva y oxidante. Se añade, además, que el Instituto de Salud Global de Barcelona (ISGlobal) ha estimado que la exposición prolongada a los subproductos de la cloración formados de manera involuntaria durante la desinfección, tiene relación con un 5% de casos anuales de cáncer de vejiga en Europa por la exposición a trihalometanos (THM) y los ácidos trihaloacéticos (HAA) (Evamplidou, et al., 2020). No obstante, dicha correlación resulta incipiente para explicar el resto de los casos, por lo cual, el principal reto es establecer una relación contundente entre el uso de cloro y el cáncer. Lo anterior aún no ha podido lograrse debido a que la recopilación de datos representativos de THM es imposible porque solo algunos países mantienen una base de datos de mediciones de THM o no se encuentra disponible al público. De hecho, en Evlampidou y sus colaboradores (2020) señalan que, en la comunidad europea, que presenta uno de los sistemas regulatorios de referencia se encuentra que *“No todos los municipios o servicios públicos de agua informan sus resultados de análisis de calidad del agua, y de hecho, entre los que lo hacen, solo un algunos de ellos señalan los valores de THM”*. Dicha situación podría ser extensiva a otras partes del mundo, pues la concentración de los distintos THM en aguas para consumo humano dependen de factores diversos, tales como el origen del agua, el pH, la temperatura, la presencia de materia orgánica, entre otros, que a su vez se relaciona con la estacionalidad, la concentración de cloro utilizada en la desinfección y el seguimiento realizado por operarios y gobiernos (Sánchez, 2011). Aunado a esto, se han encontrado cepas de *Escherichia coli* que han desarrollado resistencia a la desinfección con cloro (Toribio et al., 2016), y que además

presentan resistencia a varios antibióticos (Ulloa et al., 2018). En conjunto representan un riesgo latente para la salud humana por poseer el potencial de convertirse en uno de los mayores problemas globales, al plantear la posibilidad de un futuro sin antibióticos efectivos. Estudios recientes han establecido que existe una “numerosa evidencia científica que indica la relación entre bacterias resistentes a los desinfectantes y la adquisición de genes de resistencia a los antibióticos (GRA)” (Chacón-Jiménez, 2020), lo que motiva a una nueva reflexión sobre el uso de estas sustancias con el fin de minimizar el impacto de microorganismos multirresistentes a los antibióticos y a los biocidas.

Los procesos de oxidación avanzada (POA) son métodos eficientes que tienen la capacidad de oxidar diversos contaminantes transformándolos químicamente hasta la mineralización. La ozonización y la radiación UV se encuentran entre los más efectivos de desinfección debido a su capacidad para inactivar microorganismos patógenos resistentes al cloro y la conservación de las propiedades organolépticas del agua. Sin embargo, los costos asociados con la aplicación de ozono hacen que dicho proceso sea poco apto para diversas plantas de tratamiento, ya que el gas debe generarse *in situ* y solo se obtiene entre 1% y el 4% si se emplea aire como materia prima (CONAGUA, 2019a; Monge et al., 2018). Al mismo tiempo, es posible la generación de subproductos potencialmente cancerígenos tales como: el formaldehído, cetonas, ácidos carboxílicos, alcoholes y ésteres. Pero de acuerdo a Bataller et al., (2010), la mayoría son biodegradables y requieren filtros biológicos o filtros de carbón activado después de la ozonización, lo cual suele ser implementado dentro del proceso mismo para subsanar dicha inconveniencia. Por su parte, la radiación UV es un proceso fotoquímico que posee un efecto germicida vinculado a la longitud de onda y que es capaz de dañar fotoquímicamente los ácidos nucleicos de los microorganismos, provocando así una lisis celular (sin agregar reactivos químicos y sin la modificación significativa del pH). No obstante, una de las dificultades de este proceso consiste en que para lograr la longitud de onda requerida se emplean lámparas de vapor de mercurio con el potencial de provocar daño ambiental en su manejo y disposición posterior (Monge et al., 2018; Castillo, 2014). Actualmente, la popularidad de las fuentes de luz emitida por diodos, más conocidas como luz LED abren la posibilidad de reducir el consumo eléctrico y evitar el uso de mercurio. Sin embargo, un estudio reciente demostró que esta luz por sí sola, aún resulta insuficiente para lograr la inactivación de *Escherichia coli* y *Staphylococcus aureus* (algunos de los organismos responsables de cuadros clínicos entéricos) en placas de petri (Muñoz et al., 2016), que son algunos de los organismos responsables de cuadros clínicos entéricos. De entre estos procesos de oxidación avanzada, la fotocatalisis heterogénea con TiO_2 ha demostrado la capacidad de descomponer diversas sustancias tóxicas, compuestos orgánicos, bacterias e incluso algunos genes de resistencia (GRA) hasta su mineralización, como el gen de resistencia a la ampicilina. y el gen de resistencia específico de la *Pseudomonas aeruginosa* (Popi et al., 2018) con el uso de luz solar (Rizzo et al., 2014; Agulló-Barceló et al., 2013), luz LED (Liu et al., 2021) y en diversas matrices de agua como: aguas superficiales (Lanao et al., 2010; Lydakis-Simantiris et al., 2010), aguas de pozo (Gosgot, 2018; Polo-López et al., 2010), agua de grifo, Agua de lluvia (Saran, Arunkumar y Devipriya, 2017), agua de río contaminado con aguas residuales urbanas (Murcia et al., 2017), con agregado de ácido

húmico (Cheng et al., 2019), agua de efluentes de plantas tratadoras de aguas residuales (Ángel, 2018), agua residual farmacéutica (Mahmoudian-Boroujerd et al., 2018), Agua de pozo (Gosgot, 2018), entre otros. Todos ellos con excelentes resultados, logrando inclusive en algunos casos la inactivación total de los microorganismos involucrados. De entre los sujetos de prueba en los ensayos de desinfección con fotocatalisis heterogénea con dióxido de Titanio (TiO_2) destacan virus como el norovirus (Sun-Hyoung et al., 2017) o el virus fago F2 (Cheng et al., 2019), bacterias Gram negativas como *E. coli* (Jeong et al., 2021) y *Salmonella* (Liu et al., 2021), Gram positivas como *S. aureus* (Tzeng et al., 2021) y *Bacillus cereus* (Makropoulou, Panagiotopoulou y Venieri, 2018), Cianobacterias como *Microcystis aeruginosa* (Wang et al., 2017; Pinho, et al., 2015), Hongos como el *Aspergillus niger* (Saran, Arunkumar y Devipriya, 2017) y parásitos como los Ooquistes de *Cryptosporidium parvum* (Abeledo-Lameiro, Ares-Mazás y Gómez-Couso, 2016; Sunnotel et al., 2010), por mencionar algunos.

Por lo antes mencionado, el presente trabajo busca identificar las estrategias empleadas para la aplicación del efecto fotocatalítico de TiO_2 en la desinfección de agua a través de algunos parámetros de evaluación, mecanismos de desinfección con la cinética que mejor describa su comportamiento, las ventajas y dificultades que brinda su exploración, empleando el modelo de búsqueda “Cochrane” y su declaración Prisma 2021 aplicado a documentos publicados entre 2010 y 2020.

3. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

3.1 General

Establecer el estado del arte sobre el uso del efecto fotocatalítico de TiO_2 en desinfección de agua, empleando una metodología de búsqueda sistemática de información bibliográfica en publicaciones científicas para el periodo 2010 – 2020.

3.2 Específicos

- Definir el estado del arte sobre el uso del efecto fotocatalítico del TiO_2 en desinfección de agua mediante la búsqueda exhaustiva de artículos y tesis publicadas sobre trabajos experimentales que traten organismos relacionados con el riesgo a la salud, generados durante la última década.
- Valorar la utilidad del TiO_2 en la desinfección de agua, mediante la identificación de los microorganismos empleados como sujeto de prueba en la evaluación del desempeño.
- Identificar los parámetros operacionales a controlar experimentalmente en el uso del efecto fotocatalítico del TiO_2 para desinfección de agua, de acuerdo a las investigaciones publicadas en la última década (2010-2020).
- Definir los mecanismos de desinfección reportados y las cinéticas correspondientes, sobre el uso del efecto fotocatalítico del TiO_2 en desinfección de agua, a través del análisis de los resultados publicados en tesis y artículos de la última década.
- Establecer las ventajas/dificultades de emplear el efecto fotocatalítico del TiO_2 en desinfección de agua, a través del análisis de los resultados publicados en artículos y tesis de la última década.

4. JUSTIFICACIÓN, ALCANCES Y LIMITACIONES

4.1 Justificación

La cantidad de agua presente en la Tierra es constante, sin aumentos o disminuciones, pero la población humana sí ha crecido drásticamente, sin embargo, el agua servida resulta insuficiente para abastecer a la población actual de una manera adecuada en calidad y cantidad. De acuerdo a cifras históricas, la población mundial había tardado 127 años para duplicarse (1800-1927), aunque, sólo tardó 47 años en duplicarse nuevamente. En Khokhar y Kashiwase, (2015), mencionan que Datos del Banco Mundial estiman que la población se triplicará en el breve periodo de tiempo de 90 años (1960-2050) para alcanzar una población estimada de 9,700 millones de habitantes. Así entonces, el crecimiento de la población en el planeta y su proyección a futuro plantean serios desafíos en diversos aspectos relativos a la salud, tal como en el acceso a los servicios médicos, la disposición de agua segura para consumo y la eficiencia de los servicios de saneamiento (Sostenibilidad, 2015).

De manera técnica, menos del 1% de toda el agua dulce del planeta está disponible para consumo humano y se encuentra en lagos, ríos, humedad del suelo y depósitos

subterráneos poco profundos, cuya renovación es producto de la infiltración durante el ciclo hidrológico (CONAGUA, 2018). La facultad del agua para trasladar nutrientes y diversas sustancias constituye también el principal vehículo de exposición humana a los peligros microbiológicos, ya sea como bebida, en actividades recreativas, en el riego de alimentos o en cualquier otro tipo de contacto, siendo virus, bacterias, protozoarios, hongos y toxinas los cuales pueden encontrarse contaminando al recurso. Factores como la descarga de aguas residuales sin tratamiento a cuerpos de agua y su posterior infiltración al subsuelo, la contaminación de pozos debida a inundaciones o escorrentías causadas por el calentamiento global complican el panorama. La contaminación de los cuerpos de agua superficial y de los acuíferos reduce inmediatamente la disponibilidad del líquido, lo cual hace necesario procesos e inversiones económicas cuantiosas para su tratamiento y potabilización (SEMARNAT, 2018) constituidas por varias etapas de tratamiento físicos y químicos, siendo la desinfección el paso final en donde se busca un doble objetivo, que son: a) la oxidación de la materia orgánica remanente y b) destruir los microorganismos presentes.

Si bien, la oxidación con cloro remueve compuestos orgánicos e inorgánicos (OMS, 2018; Acero et al., 2013), el aumento de su concentración en el agua potable se ve limitado también debido a que los consumidores finales pueden detectar el cloro en el agua mediante el olfato o el gusto a partir de concentraciones de 5 mg/L, e inclusive algunas desde 0.3 mg/L. Por lo que, si la concentración de cloro libre residual alcanza valores de 0.6 a 1.0 mg/L, es probable que el consumidor rechace el agua debido a sus propiedades organolépticas (OMS, 2018). Esto lleva a que los niveles de cloración usados para eliminar efectivamente bacterias, es ineficiente en el caso de algunos organismos, tales como los ooquistos de *Cryptosporidium sp.* (Juárez et al., 2015), o algunas cepas de la bacteria *Escherichia coli* que han resultado resistentes al cloro (Ulloa et al., 2018). Ante ello, se observa necesaria la búsqueda de nuevos agentes y/o técnicas que resulten eficientes, o bien que presenten fortalezas en donde otras opciones no han obtenido resultados satisfactorios. Una de las opciones que han sido exploradas recientemente se constituye por los procesos de oxidación avanzada (POA), que son uno de los más eficientes de oxidación, degradación e inactivación de microorganismos y de compuestos químicos sin dañar las propiedades organolépticas del agua (Monge et al., 2018). La fotocatalisis heterogénea con TiO_2 emplea energía luminosa, principalmente luz UV, para promover en el agua la generación de especies reactivas de oxígeno (ERO) altamente oxidantes como el par electrón-hueco y el radical hidroxilo que rompen los enlaces estables de las moléculas contaminantes degradándolas, sin la necesidad de agregar químicos adicionales. Este proceso tiene la capacidad de transformar directamente los contaminantes mencionados anteriormente en CO_2 y agua con la posibilidad de utilizar luz solar como fuente inagotable de especies oxidantes, que eliminan del vital líquido compuestos indeseables (Monge et al., 2018; Nevárez - Martínez et al., 2018). En comparación con otros procesos de purificación, esta técnica ha demostrado ser un método sostenible y energéticamente eficiente para el tratamiento de diversas matrices de agua, desde el agua cruda de pozo (Gosgot, 2018), hasta aguas superficiales contaminadas con descargas de aguas residuales (Murcia et al., 2017). Por esta razón se ha considerado como una alternativa innovadora y eficaz en el tratamiento de agua, con la ventaja de que permitiría reducir riesgos laborales, costos

operacionales, el rechazo por el consumidor y la generación de subproductos de reacción potencialmente cancerígenos. La elaboración de este proyecto de investigación, servirá para establecer el estado del arte en la aplicación del efecto fotocatalítico de TiO_2 en la desinfección de agua a través de algunos parámetros de evaluación como: los métodos de síntesis/obtención del TiO_2 más efectivos, los microorganismos empleados como sujeto de prueba, el control de los parámetros operacionales, los mecanismos de desinfección reportados, las ventajas e inconvenientes de su uso, la eficiencia de eliminación/ inactivación de microorganismos y los modelos cinéticos que mejor describen su comportamiento.

Si bien el TiO_2 como agente desinfectante alternativo presenta algunas dificultades, como un costo mayor, complicaciones en la aplicación a una escala superior a la de laboratorio, la insuficiente determinación convencional de parámetros básicos que resultan indispensables en la evaluación de la desinfección como: la concentración del fotocatalizador, la concentración del microorganismo, el pH, el tipo de luz, la intensidad de iluminación, la configuración del fotoreactor, tiempo de irradiación, entre otras, comparado a las alternativas convencionales de desinfección que ya se han establecido como la cloración, ozonización o irradiación UV (Magaña et al., 2021), se reconocen las propiedades fotocatalíticas del TiO_2 desde hace un siglo como colorante en pintura, agente para oxidar contaminantes o eliminar organismos bacterianos y lograr la esterilización fotoquímica con resultados satisfactorios (Matsunaga, 1985) con la ventaja de ser comercial, ecológicamente accesible, sin partículas tóxicas, fotoquímicamente estables y la posibilidad de generar menos subproductos de desinfección. Así entonces, dichos resultados lo perfilan como una propuesta interesante y con potencialidad de uso en desinfección de agua a ser explorada.

4.2 Alcances

Este estudio se realiza sobre el estado del arte de la desinfección fotocatalítica de agua basada en los métodos en los que se sintetiza u obtiene el TiO_2 , la eficiencia de eliminación/inactivación de microorganismos en sistemas acuosos, sus parámetros operacionales, así como, el modelo cinético que mejor se ajuste a su comportamiento determinados mediante una búsqueda exhaustiva y metodológica de publicaciones del tema de los últimos 10 años.

Finalmente, bajo la misma metodología, se identifican los mecanismos de acción y su participación dentro de la eliminación/inactivación fotocatalítica, así como un resumen de las ventajas/dificultades experimentadas durante su aplicación.

4.3 Limitaciones

El presente trabajo es un estudio documental que se realiza empleando la metodología de las revisiones Cochrane y su declaración Prisma 2021, únicamente con base en los trabajos publicados en la última década (2010-2020), donde o el resultado de los buscadores, revisión de artículos y referencias de los cuales se disponga de acceso completo en idioma inglés o

español del tema a estudiar, empleando para la búsqueda documental en buscadores, se emplearon palabras clave como: agua, desinfección, fotocatalisis heterogenea, microorganismos, TiO₂, *water, disinfection, heterogeneous photocatalysis, microorganisms*.

4.4 Definición de las preguntas a resolver

A través de esta investigación, se pretende resolver las siguientes preguntas:

- i. ¿Cuáles son los principales métodos de síntesis/obtención del TiO₂ que se emplean en ensayos de desinfección en agua?
- ii. ¿Qué microorganismos son ocupados como sujeto de prueba en los ensayos de la desinfección fotocatalítica del agua?
- iii. ¿Cuáles son los parámetros que se controlan en la aplicación del efecto fotocatalítico del TiO₂ en la desinfección de agua?
- iv. ¿Qué comportamiento sigue la eliminación/inactivación de los microorganismos en agua y cuáles son los resultados que logran?
- v. ¿Qué ventajas/dificultades se encuentran al aplicar el efecto fotocatalítico del TiO₂ en los ensayos de desinfección?

5. MARCO DE REFERENCIA

5.1 Contaminantes biológicos del agua y riesgos a la salud

Los microorganismos se encuentran presentes en todas partes y gracias a ellos la vida en el planeta y su diversidad es posible. De hecho, el 90% de lo que constituye al ser humano, son microbios y por cada célula en el cuerpo humano se estima que existen 10 células microbianas (Infosalus, 2018). La inmensa mayoría son benéficas y participan en diversas funciones del organismo de forma simbiótica con el cuerpo humano. En el agua, los microorganismos más comunes son virus, bacterias y protozoarios que ayudan al reciclaje de nutrientes por lo que sólo algunos microorganismos son patógenos con el potencial de ocasionar graves daños a la salud como hepatitis. Para causar daño por una infección, se necesitan una cantidad de 100 mil a millones de bacterias, por eso, es muy importante determinar la cantidad de microorganismos presentes en los cuerpos de agua y reducir la población de microorganismos a niveles que no representen peligros a la salud a través de la desinfección (Castillo, 2021). Las actividades antropogénicas aportan elementos ajenos a los cuerpos de agua, causan alteraciones que rompen el balance de la naturaleza. Uno de esos desbalances es la resistencia de las bacterias a los antibióticos y a los desinfectantes, producto natural de la interacción de los microorganismos con pequeñas concentraciones de estos productos, por lo que es necesario entender el comportamiento de la microbiota y estudiar nuevas alternativas de desinfección.

En el año 2010, a través de la Resolución 64/292, la Asamblea General de las Naciones Unidas reconoció expresamente el derecho humano al agua y al saneamiento que son esenciales para que se puedan cumplir el resto de los derechos humanos (ONU, 2014). En México se realizó una reforma constitucional al párrafo sexto del artículo 4º, que se publicó el 8 febrero de 2012 en el Diario Oficial de la Federación (DOF), donde se eleva a rango constitucional el derecho humano al agua y saneamiento con la participación de la federación, las entidades federativas, los municipios y la ciudadanía (CNDH, 2014), constituyéndolo, así como un derecho fundamental. Sin embargo, las distintas actividades humanas ejercen una presión importante directa e indirectamente sobre el ciclo hidrológico. La producción de bienes y servicios ha traído consigo una mayor demanda del líquido, y también una mayor generación de agua residual, de la cual, aproximadamente el 80% se vierte sin tratamiento en los cuerpos de agua superficiales (UNESCO, 2018). Dichas costumbres han derivado en consecuencias negativas para la calidad de vida de la población, así como los ecosistemas naturales y su biodiversidad. La magnitud del efecto de las actividades humanas resulta evidente y con efectos duraderos que, incluso se ha propuesto que se distinga este periodo como una nueva era geológica denominada “antropoceno” (UNESCO, 2018).

La calidad del agua y del aire se encuentran entre los principales factores ambientales relacionados con daños a la salud. El acceso a “agua segura” es prioridad para la sociedad y la salud humana, pero también es esencial para el ambiente, donde los microorganismos patógenos transmitidos por el agua pueden representar una potencial amenaza para la salud y el bienestar del ser humano, e inclusive de la vida silvestre. Las enfermedades transmitidas por el agua son aquellas donde el líquido actúa como un vehículo pasivo del agente infeccioso, generalmente cuando se tiene una calidad deficiente en la potabilización del agua para uso y consumo humano. Así entonces, puede ser vehículo de virus, bacterias, protozoarios, hongos y helmintos que causan afecciones conocidas genéricamente como enfermedades relacionadas con el agua o de origen hídricas mostradas en la Tabla 5.1.

Tabla 5.1 Enfermedades transmitidas por el agua (ETA).
(Realizada con información de Lenntech, 2021c; CONAGUA, 2019b; OMS, 2018;)

Características	Microorganismos involucrados	Enfermedades que producen
Las personas quedan afectadas por estas enfermedades debido al contacto con agua contaminada, gotas de agua, aerosoles, aguas de lavado y aguas de baño.	Virus:	
	Hepatovirus	Hepatitis A
Se producen debido a una pobre calidad de la potabilización del agua para uso y consumo humano o contaminación de éstas con aguas residuales.	Virus de la hepatitis E	Hepatitis E
	Adenovirus, Astrovirus	Gastroenteritis
	Poliovirus	Poliomielitis
	Bacterias:	
	<i>Campylobacter</i> Jejuni	Diarrea aguda,
	<i>Salmonella</i> Typhi	Fiebre tifoidea,
	<i>Vibrio cholerae</i>	Cólera
	<i>Shigella</i> spp.	Disentería bacilar,
	<i>Helicobacter pilory</i>	Gastritis crónica
	<i>Escherichia coli</i>	Síndrome hemolítico urémico (SHU)
Protozoarios		
<i>Entamoeba histolytica</i>	Disentería amebiana,	
<i>Acanthamoeba culbertsoni</i>	Encefalitis granulomatosa amebiana	
Helmintos:		
<i>Fasciola</i> hepática	Fasciolosis	
<i>Shistosoma</i> spp.	Esquistosomiasis	
<i>Ascaris lumbricoides</i>		

En México, las enfermedades transmitidas por el agua figuran entre las primeras 20 enfermedades con más casos registrados, ocupando el segundo lugar con los padecimientos de infecciones intestinales debidas a diversos microorganismos, dentro del subgrupo de enfermedades infecciosas y parasitarias del tracto digestivo se ubican personas de entre 1-24 años, siendo los de edad preescolar (3-5 años de edad) y hasta los 14 años de edad los segmentos más numerosos (Gobierno de México, 2019). Las enfermedades diarreicas aguda-severa son la segunda de las principales causas de mortalidad sujetas a vigilancia epidemiológica en el grupo de infantes menores de 1 año, y también en el grupo de 1 a 4 años de edad en infantes (SSA, 2020). La mortalidad por infecciones intestinales es un indicador que ayuda a entender el peso de las condiciones sanitarias hídricas del país.

La contaminación de cuerpos de agua superficiales y de los acuíferos reduce inmediatamente la disponibilidad del líquido en calidad y cantidad suficientes para cumplir con el artículo 4º de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos, en su párrafo sexto, donde se afirma que “toda persona tiene derecho al acceso, disposición y saneamiento de agua para consumo personal y doméstico en forma suficiente, salubre, aceptable y asequible”. Ello hace necesario procesos e inversiones económicas suficientes para satisfacer

la garantía establecida constitucionalmente. Así entonces, para su tratamiento y potabilización se requiere que el agua:

- a. Se encuentre libre de compuestos químicos o patógenos que pongan en riesgo la salud de los consumidores.
- b. Sin sabor u olor desagradable.
- c. Libre de turbiedad.
- d. Con baja dureza que evite el requerir grandes cantidades de detergentes y jabones para la ducha o el lavado de ropa y
- e. No corrosiva para el sistema de distribución (SEMARNAT, 2018).

En la naturaleza se siguen ciclos de uso y reúso de nutrientes, donde el agua no es la excepción, ya que para ello se han diseñado normas que ayuden en la reutilización del agua o su retorno e incorporación a la naturaleza para completar su ciclo, de manera que se busca reducir el perjuicio ambiental. La NOM-001-SEMARNAT-1996 establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en cuerpos de agua y bienes nacionales y uso de riego agrícola después de ser usadas y tratadas con el objetivo de protegerlos. Establece como indicador de contaminación por patógenos a los coliformes fecales (CF), cuya concentración mensual deberá ser menor a 1000 NMP/100 mL o 2000 NMP/100 mL diarios y como indicador de parásitos a los huevos de helminto (HH) cuya concentración deberá ser menor o igual a 1 HH/L para riego restringido, es decir, el agua residual destinada a la actividad de siembra o cultivo de productos agrícolas, con la excepción de legumbres/ verduras que se consumen crudas y de 5 HH/L para riego no restringido que se usa en la siembra, cultivo y cosecha de productos agrícolas en forma ilimitada como forrajes, granos, frutas, legumbres y verduras.

El proyecto para actualizar esta norma PROY-NOM-001-SEMARNAT-2017 reduce los límites máximos a 1000 NMP/100 ml mensuales y 1200 NMP/100ml diarios en el caso de CF y a 1HH/L para los parásitos, donde con ello se pretende la disminución y/o dispersión de algunas de los padecimientos hídricos derivados de los usos y costumbres asociados al agua negra y tratada mediante la restricción del volumen de carga biológica independientemente del uso del agua. Por otro lado, se añade el análisis de Carbono orgánico Total cuya presencia reacciona con los compuestos químicos que se utilizan para la desinfección, como el cloro, y forma subproductos de la desinfección que pueden ser cancerígenos (THM, HAA), la determinación de Enterococos fecales en lugar de Demanda Química de Oxígeno y *E. coli* sólo para aquellas descargas de aguas residuales que presenten concentraciones mayores a 1000 mg/L de cloruros. También se agrega la determinación de la toxicidad aguda, que es la capacidad de una sustancia para producir efectos perjudiciales sobre un ser vivo, y que se puede presentar la descarga por sustancias de las cuales no se conoce su concentración, empleando para ello *Daphnia magna* y *Vibrio fischeri* como organismos de prueba para aguas residuales en general y *Artemia* sp. para aguas con alta conductividad. Esta prueba se realiza con un número determinado de microorganismos puestos en contacto con la muestra, la cual elevará su concentración hasta que la mitad de los

microorganismos reporten la mitad de mortandad (CE_{50}), que es la concentración que inhibe un proceso vital en el 50% de la población expuesta de organismos de prueba con el fin de evitar daños ecológicos por sustancias persistentes como los antibióticos (Chiriboga, 2017).

Es importante mencionar, que si bien, dicha propuesta se efectuó desde el año de 2017, éste aún no ha sido publicado de manera oficial. Por su parte, la NOM-002-SEMARNAT-1996 regula los contaminantes presentes en las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano la cual pone especial atención en grasas y aceites, sólidos sedimentables y metales como: arsénico, cadmio, cianuro, cobre, cromo y mercurio. Finalmente, la NOM-003-SEMARNAT-1997 establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas para las aguas residuales tratadas que se reúsen en el servicio al público, el cual se divide en contacto directo como el llenado de lagos artificiales recreativos con paseos en lancha, fuentes de ornato o lavado de vehículos y en contacto directo u ocasional como el riego de jardines, campos de golf o lagos artificiales no recreativos. Para el primero el límite máximo en la concentración de CF es de 250 NMP/100 ml y menor o igual a 1 HH/L, para el segundo caso se permite una concentración máxima de 1000 NMP/L en CF y menor o igual a 5HH/L en el promedio mensual. Es importante señalar que basta con el consumo de un HH viable para adquirir la infección.

En materia de agua potable, la norma oficial mexicana NOM-127-SSA1-1994 para agua de uso y consumo humano, solo se establecen los organismos CF y totales como indicadores de agentes biológicos nocivos a la salud y recomienda la desinfección con compuestos de cloro, ozono o radiación ultravioleta. Si bien los métodos de potabilización empleados actualmente para la eliminación de bacterias en el agua, también logran eliminar otro tipo de grupos de organismos de interés sanitario, también existen algunos de estos que son inalterables por los tratamientos de cloración. En la última década se han realizado esfuerzos para desarrollar tecnologías para eliminar o inactivar microorganismos considerando los impactos secundarios que dichos agentes tengan en el ambiente. Aunque los métodos de desinfección existentes (cloración, ozonización, irradiación UV, entre otros) pueden controlar e inactivar patógenos en el tratamiento del agua potable, éstos pueden ser intensivos en químicos o energía, y también pueden representar un riesgo a la salud debido a la generación de subproductos de la desinfección, tal como los THM y HAA que resultan tóxicos y presumiblemente con potencialidad cancerígena en relación a su concentración y tiempo de exposición (Evamplidou et al., 2020; Acero et al., 2013).

El proyecto de norma mexicana PROY-NOM-127-SSA1-2017 contempla la formación de diversos subproductos de reacción como los THM, HAA, aniones (bromatos, cloratos y cloritos) y carbonilos (formaldehído), estableciendo Límites Máximos Permisibles (LMP), además de integrar la detección de la bacteria *E. coli* y al protozoo *Giardia lamblia* como organismos indicadores de agentes biológicos nocivos a la salud aunado a la detección y seguimiento de la fitotoxina Microcistina-LR cuando el agua proviene de una fuente superficial. No obstante, éstos esfuerzos de modificación a la legislación podrían ser insuficientes para certificar la seguridad del agua de consumo. Estudios recientes en América

Latina han demostrado que existe poca relación entre la presencia de indicadores bacterianos de contaminación en agua según lo establecido por legislación y la presencia de elementos patógenos tales como virus u otros organismos. Hasta el 75% de las muestras de agua de red y hasta en la totalidad de las muestras de agua de pozo que cumplían con la normativa vigente contenían algún patógeno como enterococos o pseudomonas u otros organismos aerobios mesófilos y adenovirus (Juárez et al., 2015). No obstante, a pesar de que se han realizado extensas investigaciones, ningún virus u otro organismo parasitario ha sido identificado todavía como un indicador universal único (Skraber, 2004).

La presencia o aumento de virus, bacterias, protozoarios, hongos y helmintos en el agua surge usualmente por efecto directo o indirecto de cambios en el ambiente y en la población, tal como urbanización sin control, crecimiento industrial, pobreza, ocupación de regiones antes deshabitadas, y la disposición inadecuada de excretas humanas y animales (Ríos-Tobón et al., 2017). En los siguientes segmentos se analizarán las características de los principales contaminantes biológicos del agua antes mencionados.

5.1.1 Virus

Es una partícula de código genético, ADN o ARN, encapsulada en una cubierta de proteínas. Necesitan infectar células y usar componentes de la célula hospedera para reproducirse y hacer copias de sí mismos, contando así solo con dos o tres de los siguientes componentes:

- a. Tienen un ácido nucleico, que puede ser ADN o ARN de cadena simple o de cadena doble.
- b. Rodeando el ácido nucleico hay una cubierta proteica en forma cápside, o pequeñas unidades que se ensamblan.
- c. Algunos virus también tienen una envoltura que obtienen cuando emergen de la célula. Los virus sólo pueden sobrevivir dentro de una célula viva ya que la necesitan para poder sobrevivir y replicarse (Graham, 2020).

Los virus pueden persistir durante largos periodos en el agua, por lo que es indispensable conocer los factores que influyen sobre la contaminación viral de los cuerpos de agua superficiales, entre los que se incluyen:

- a. La distancia desde la descarga del efluente de agua residual recorrida por el virus.
- b. El período patógeno-clínico y, por lo tanto, la concentración viral inicial.
- c. Las condiciones ambientales como: caudal, pH, salinidad y temperatura, entre otros.
- d. Las características de supervivencia y

- e. El transporte del virus, de hecho, los virus son libres o pueden estar adheridos a sólidos en suspensión (Ríos-Tobón et al., 2017).

Como consecuencia, la tarea crucial de evaluar la contaminación viral del agua de los ríos que es una de las principales fuentes de agua potable resulta sumamente difícil. Los virus son la principal causa de morbilidad y mortalidad en las enfermedades de transmisión hídrica y en ningún caso se consideran flora normal del tracto gastrointestinal de animales y humanos. El 87% de enfermedades virales transmitidas por agua son causadas por el virus de la hepatitis A, adenovirus y rotavirus (OMS, 2018; Espinosa-García et al., 2004).

Los agentes patógenos que se pueden transmitir a través del agua de consumo humano contaminada suman al momento más de 140 virus entéricos patogénicos diversos en cuanto a sus características, comportamiento y resistencia. De acuerdo a las guías para la calidad del agua de consumo humano de la OMS, (2018), los agentes virales relevantes en la gestión de sistemas de abastecimiento de agua de consumo humano son los siguientes:

Astroviridae: Son virus pequeños (28 nm), redondos, con un aspecto característico de estrella de cinco o seis puntas, del cual deriva su nombre procedente del griego *astron* (estrella). Su genoma está constituido por una cadena sencilla de ARN de polaridad positiva. Esta familia comprende virus humanos y animales, y se divide actualmente en dos géneros: *Mamastrovirus* que lo componen virus humanos, felinos, ovinos, porcinos y bovinos, mientras que el género *Avastrovirus* incluye astrovirus de pavos, patos y el virus de la nefritis aviar. Se ha publicado sobre la supervivencia de astrovirus en el agua potable, lo que tiene importancia sanitaria (Sánchez-Fauquier et al., 2018). Se consideran segundo lugar en importancia, después de rotavirus, como agente causante de diarreas de entre el 4% y el 10% de los casos en niños y por lo general no requiere de hospitalización. Con frecuencia en casos de diarrea infantil se ha encontrado una coinfección de astrovirus con rotavirus, lo que complica el entendimiento desde el punto de vista epidemiológico (Espinosa-García et al., 2004)

Adenoviridae: Constituye una familia de virus de tamaño medio (70-90 nm) que presenta una alta tasa de contagio, la cual infecta tanto a humanos como a otros animales. Ella comprende los géneros *Mastadenovirus* y *Avianadenovirus* que afectan, respectivamente, a los mamíferos y a las aves. Presentan un genoma compuesto por una doble cadena lineal de ADN protegido por una nucleocápside de simetría icosaédrica formada por 240 capsómeros hexagonales (hexones) que ocupan las caras y aristas, y 12 pentagonales (pentones) que se sitúan en los vértices. Carecen de envoltura lipídica, lo que les confiere la propiedad de ser resistentes a los agentes externos (Calicó, 2018).

Caliciviridae: Los principales causantes de gastroenteritis en humanos y animales a nivel mundial son el *sapovirus* y *norovirus*. Son importantes como agentes de transmisión zoonótica. Son virus sin envoltura, resistentes a las condiciones ambientales, y una resistencia moderada al cloro (OMS, 2018). En su clasificación inferior, el género *Norovirus* está

reportado en el mundo como uno de los principales causantes de cuadros diarreicos por transmisión hídrica. De hecho, se ha intentado emplear como un bioindicador viral ideal de enfermedades transmitidas por el agua y los alimentos, sin embargo, el costo, tiempo y requerimiento de tecnologías especializadas necesarias para su determinación dificultan su establecimiento como bioindicador de calidad. No obstante, recientemente se han propuesto los fagos, especialmente los colifagos (fagos: F2, MS2, ΦX174, Fago PR772) que afectan coliformes, se encuentran de manera abundante en aguas para su detección (Lerma y Farga., 2018), aunque con problemas menores, no resultan por convencer como organismos ideales.

El norovirus humano (HuNoV) es una de las principales causas de padecimientos transmitidos por los alimentos asociadas con el consumo de mariscos. El HuNoV es la principal causa de brotes de gastroenteritis aguda no bacteriana, causando aproximadamente el 60% de todas las enfermedades transmitidas por alimentos notificados anualmente (Sun-Hyoung et al., 2017). La capacidad infectiva de los norovirus persiste por más de dos meses en las agua subterránea, por tanto, la gestión y desinfección eficaces de los HuNoV en el agua es importante para la salud pública. Un ensayo de capacidad infectiva viral es fundamental para determinar sus tasas de inactivación. Sin embargo, aún no se han desarrollado protocolos de cultivo para los (HuNoV), por lo cual se han utilizado otros virus biológicamente similares, como el norovirus murino (MNV) y el calicivirus felino (FCV), como sustitutos del HuNoV (Lee y Ko, 2013).

Picornaviridae: La familia *Picornaviridae* (pico: pequeño, ARN y virus) consta de cuatro géneros. Dos de éstos afectan sólo a los animales (*Cardiovirus* y *Aphthovirus*) y los otros son importantes patógenos humanos: *Rhinovirus* y *Enterovirus*. Los enterovirus presentan una cápside de simetría icosaédrica, sin envoltura; tienen un tamaño pequeño (20-30 nm), poseen ARN de cadena única y polaridad positiva, por lo que se replican utilizando el propio ARN como mensajero con diversas enfermedades en humanos y otros mamíferos. Tratándose de virus entéricos humanos, en general el número de partículas que pueden ser excretadas por individuos infectados es de 10⁸ a 10¹⁰ PFU/g de heces (Espinosa-García et al., 2004). Se conocen más de 70 serotipos que causan infecciones, de naturaleza subclínica, aunque en caso contrario se presentan sintomatología sobre el sistema nervioso central, como la ataxia cerebelar, encefalomiелitis, meningitis aséptica, miелitis transversa, poliomiелitis, síndrome de Guillain-Barré, etc. Los causantes de hepatitis viral, se incluyen dentro de esta familia. Dentro de este grupo se encuentran virus de la hepatitis A, B, C, D, E, F, G, siendo el A y el E los más frecuentemente transmitidos por medio de aguas contaminadas. Los parechovirus humanos (HPeV) también pertenecen a esta familia, recientemente descritos, a los que se atribuyen cuadros de encefalitis, fiebre sin foco, gastroenteritis, meningitis o sepsis clínica fundamentalmente en lactantes pequeños (Lerma y Farga, 2018; Ríos-Tobón et al., 2017).

Reoviridae: Los Rotavirus son un género dentro de esta familia que se caracterizan por ser virus sin envoltura, de 70 nm de diámetro y por contener un genoma compuesto por 11 segmentos de ARN bicatenario. La cápside viral está formada por tres capas proteicas

concéntricas que envuelven el genoma. Su representación la hacen siete grupos de la A - G, siendo más prevalentes los grupos A, B y C con predominio del primero, causante de diarrea acuosa y vómito especialmente en niños. Son virus sin envoltura, estables en el ambiente y de fácil propagación por su pequeña dosis infectiva (Wilhelmi et al., 2001). Se adquiere por el consumo de alimentos o agua contaminados, y se desarrolla después de uno o dos días de incubación, presentándose gastroenteritis de manera súbita con vómito y diarrea, fiebre y en ocasiones dolor abdominal, originando una deshidratación severa, hospitalización y eventualmente a la muerte, especialmente en infantes. Este virus es responsable de alrededor de 800,000 muertes de niños menores de cinco años cada año en todo el mundo, y en México, es el principal agente viral que causa diarrea severa en niños menores de dos años (Espinosa-García et al., 2004).

En general, los virus son los agentes patógenos más pequeños con diámetros que van desde los 20 nm hasta los 90 nm y, por lo tanto, son los más difíciles de eliminar por procedimientos físicos, como la filtración. Hay virus específicos que pueden ser menos sensibles a la desinfección que las bacterias y otros organismos parasitarios, como el adenovirus que es menos sensible a la luz UV. En México y América Latina la legislación no incluye en ninguna norma la determinación de virus ni fagos en el diagnóstico, seguimiento y control de la calidad del agua para consumo humano (Ríos-Tobón et al., 2017).

5.1.2 Bacterias

Las bacterias son microorganismos que presentan un tamaño de entre 0,5 y 5 μm de longitud. que se presentan en diversas formas como: barras (bacilos), esferas (cocos), filamentos curvados (vibrios) y helicoidales (espirilos y espiroquetas). Poseen una pared celular compuesta por peptidoglicano (también llamado mureína). La pared gruesa clasifica a las bacterias como Gram positivas al teñirse de azul-violeta con la tinción de Gram y la pared delgada clasifica a las bacterias como Gram negativas al teñirse de rojo-rosa con la misma tinción. Algunos organismos presentan motilidad por disponer de flagelos u otros sistemas para desplazarse. Son los organismos más abundantes del planeta, se encuentran en todos los hábitats terrestres y acuáticos. La pared celular de la bacteria *E. coli*, contiene grupos cargados positivamente como amidas, proteínas y péptidos y grupos cargados negativamente como carboxilatos, polisacáridos y fosfonatos. Si bien esta carga se distribuye de manera desigual sobre la superficie, en la pared celular predominan los grupos cargados negativamente, lo que conduce a una carga negativa neta. Es frecuente encontrar bacterias de ambos grupos en el agua residual, y aunque las dos cepas tienen estructuras diferentes, ambas tienen una superficie cargada negativamente debido a la presencia de grupos funcionales como grupos carboxilo, fosfato y amino incrustados en sus membranas celulares. Se estima que se pueden encontrar en torno a 40 millones de células bacterianas en un gramo de tierra y un millón de células bacterianas en un mililitro de agua dulce. En total, se calcula que hay aproximadamente 5×10^{30} bacterias en el mundo (Murray, 2018; Whitman, 1998). Existen bacterias que ayudan a mantener la salud y prevenir enfermedades y de poseer un efecto

inmunomodulatorio (Gallo, 2017), denominadas bacterias benéficas o probióticas. Dentro de las cuales se encuentran *Lactobacillus* spp. y *Bifidobacterium* spp., y se caracterizan por brindar beneficios a sus hospederos al crear un microbioma intestinal, la cual es favorable para su desarrollo y limitante para el de las bacterias patógenas como *E. coli* y *Salmonella* spp., que son responsables de provocar cuadros diarreicos agudos.

Las bacterias patógenas humanas son aquellas que causan enfermedades infecciosas, tales como tétanos, difteria, fiebre tifoidea, gonorrea, lepra, sífilis, entre otros. Dentro de las bacterias establecidas como contaminantes del agua se han aislado Gram negativas, especialmente pertenecientes a los géneros *Achromobacter*, *Acinetobacter*, *Aeromonas*, *Alcaligenes*, *Bordetella*, *Flavobacterium*, *Gallionella*, *Moraxella*, *Neisseria*, *Pseudomonas* y *Vibrio*. El grupo bacteriano que cumple con las características de potencial bioindicador de calidad del agua es el de los *coliformes* y enterobacterias o *Enterobacteriaceae* gen. sp., que generan ácidos como producto final. Corresponden a 10% de los microorganismos intestinales humanos y animales, por lo que su presencia en el agua está asociada con contaminación fecal e indica tratamientos inadecuados o contaminación posterior (Ríos-Tobón et al., 2017).

Las bacterias tienen la capacidad de desarrollar mecanismos de Resistencia a los Antimicrobianos (RAM) y convertirse en una bacteria resistente a antibióticos (BRA), ya sea de alguna de las siguientes formas:

- a. Sintetizando enzimas que hidrolizan al antimicrobiano.
- b. Modificando un aminoácido que genera un blanco diferente y así disminuye la afinidad de unión por el antibiótico.
- c. Disminuyendo la permeabilidad de la pared celular al ingreso del antimicrobiano.
- d. Empleando bombas de eflujo que transporta al antibiótico hacia el exterior de la célula sin modificaciones y sin acción microbiana. Se ha encontrado que esta estrategia también la emplean en presencia de biocidas como cuaternarios de amonio y compuestos halogenados

La resistencia antimicrobiana es un problema grave, continuo y en aumento, pues ahora se sabe que algunas bacterias tienen la facultad de transmitirlo, no sólo a su descendencia, sino también a otras bacterias de diferente especie a través de la transferencia horizontal de genes entre diferentes especies bacterianas (Moreno et al., 2009). En 2015 el meta-análisis de un estudio efectuado por efectuado por Chacón-Jiménez (2020) basado en la secuenciación de 2522 genomas encontró que el 17% de los genomas estudiados posee resistencia tanto a los desinfectantes (alcoholes, compuestos halogenados, derivados del cuaternario de amonio) como a los antibióticos, siendo las bacterias *Citrobacter*, *Enterobacter*, *Escherichia*, *Klebsiella*, *Salmonella* y *Staphylococcus*. Aunque actualmente la relación entre la resistencia conjunta a biocidas y antibióticos sea debatible, es un asunto que debe seguir observándose, pues al igual que los antibióticos los biocidas se encuentran dispersos en el mundo y su uso se encuentra escasamente regulado (Alós, 2015). En México, se publicó la Estrategia Nacional de Acción contra la Resistencia a los Antimicrobianos en

el diario oficial de la federación para realizar las acciones necesarias que permitan contener el proceso de la RAM. Dichas acciones están dirigidas a disminuir el riesgo de desarrollo de resistencia mediante el monitoreo sistemático y permanente de la calidad del agua para fomentar el tratamiento adecuado de las aguas residuales y su reúso, y profesionalizar la desinfección del agua de uso y consumo humano a través de la capacitación a los organismos operadores los sistemas de abastecimiento (DOF, 2018).

Las cianobacterias son organismos fotosintéticos que producen metabolitos secundarios con importantes propiedades biológicas como actividad anticancerígena antiinflamatoria y antiviral. Algunas especies de algas verde azules, fundamentalmente de los géneros *Mycrocystis*, *Anabaena*, *Oscillatoria*, y *Nostoc* producen fitotoxinas también denominadas cianotoxinas como metabolitos secundarios o durante la “muerte celular” (lisis) y están relacionados con muchos eventos de intoxicación humana y animal (Navarro, 2002).

La principal vía de exposición puede ocurrir a través del consumo de pescado y vegetales regados con agua dulce contaminada, por ingestión de agua para beber contaminada o durante el uso recreativo de cuerpos de agua con floraciones de cianobacterias. Las cianotoxinas se clasifican en hepatotoxinas (hígado), neurotoxinas (sistema nervioso), citotoxinas (varios órganos: hígado, intestino delgado, glándulas suprarrenales, riñones) y dermatotoxinas (toxinas irritantes). Entre las hepatotoxinas, las microcistinas (MC) son las más prevalentes en el agua dulce, donde a la fecha se han encontrado 246 variantes dispersas por todo el mundo siendo la LR (MC-LR), RR (MC-RR) e YR (MC-YR) las más habituales. Australia estableció niveles de concentración de alerta para algunas cianotoxinas, por ejemplo: 10 µg/L para MC-LR al igual que para nodularina (Chorus, 2021; Navarro, 2002), por ello la OMS estableció un valor guía de concentración en agua potable de 1 µg/L para MC-LR (OMS, 2011). Por otra parte, las citotoxinas están representadas fundamentalmente por la cilindropermopsina (CYN) que es altamente soluble en agua debido a su naturaleza bipolar, se encuentra presente en varias partes del mundo incluyendo países de Europa como Alemania, Francia, Italia, Portugal y también España, principalmente en los climas templados y también, se han manifestado casos de contaminación de agua de grifo como el de Palm Island, Australia en 1979, comprobándose en 1984 la presencia de *Cylindropermopsis raciborskii*.

La CYN se aisló y purificó de la cianobacterias por primera vez en 1992 (Fernández et al., 2005a). Hasta la fecha, se conocen cinco análogos: CYN, 7-epi-CYN, 7-deoxydesulfo-CYN, 7-deoxydesulfo-12-acetil-CYN y 7-desoxi-CYN. Las concentraciones ambientales de CYN suelen oscilar entre 1 y 10 µg/L, no obstante, se han informado concentraciones de hasta 800 µg/L, por lo que, la OMS recomienda adaptar los programas de seguimiento para realizar muestreo y análisis que permitan identificar evidencias de cantidades crecientes de cianobacterias, tanto para el agua potable como para el uso recreativo del agua. En el caso del agua de bebida se establece la concentración de 1 µg/L para la Alerta nivel 1 y 12 µg/L para alerta nivel 2. En el caso de agua para uso recreativo se establece una concentración de 42 µg/L (OMS, 2020). Por su parte la Agencia de Protección Ambiental de los EE. UU. incluyó MC y CYN en su Lista de Contaminantes Candidatos IV, con un aviso de salud de

10 días de 1.6 µg / L para MC y de 3 µg/L para CYN para adultos (USEPA, 2015). Las cianotoxinas extracelulares y sus metabolitos son estables y difíciles de eliminar del agua. En condiciones ambientales naturales, las cianotoxinas pueden persistir durante largos períodos debido a la lenta degradación química y biológica, por lo tanto, pueden ingresar a plantas de agua potable (PP) que no están diseñadas para lidiar con estos contaminantes (Camacho-Muñoz et al., 2020; De La Cruz et al., 2013; Fernández, 2005a).

La detección, cuantificación y seguimiento de estas cianotoxinas en agua puede llegar a ser costoso, dependiendo del método empleado. El PROY-NOM-127-SSA1-2017 establece que la detección de MC-LR se realizará con el método de ELISA en el que un cambio en la coloración indica la presencia o ausencia y en caso positivo se procede a la cuantificación por medio de HPLC o por cromatografía líquida/espectrometría de masas en tándem (LC/MS/MS). La cromatografía líquida de alta eficacia (HPLC por sus siglas en inglés) es uno de los métodos más empleados y permite detectar concentraciones inferiores a la alerta nivel 1. También es posible emplear indicadores biológicos con organismos acuáticos como *Daphnia* y *Artemia* en bioensayos (Cantoral et al., 2017). Si bien las fitotoxinas se consideran una amenaza significativa para los seres humanos, los animales, el medio ambiente e incluso los ecosistemas debido a su alta solubilidad en agua, toxicidad y estabilidad química.

La Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (USEPA) se ha centrado claramente en tres de ellas como la mayor amenaza para el ambiente: microcistina-LR (MC-LR), cilindrospermopsina (CYN) y anatoxina-a. De todas las toxinas cianobacterianas conocidas, MC-LR (L para leucina y R para arginina) se considera la más tóxica de las microcistinas y la más abundante y dañina en los sistemas acuáticos (Khedr et al., 2019).

5.1.3 Protozoarios

Son un conjunto de microorganismos que se hallan en ambientes húmedos o acuáticos. Su tamaño oscila entre 10 y 50 µm y se conocen alrededor de 300,000 especies. En su mayoría son retenidos en el proceso de filtración de los sistemas de tratamiento, algunos son resistentes a la cloración, debido a que como parte de su ciclo de vida son capaces de formar ooquistes y trofozoitos (rodeados de una pared gruesa). Son causantes de cuadros diarréicos en las especies que parasitan y, en algunas ocasiones, son organismos oportunistas causantes de enfermedades graves e incluso de la muerte en población sensible (niños, ancianos y pacientes inmunocomprometidos). Algunos de los organismos patógenos de mayor frecuencia en agua contaminada son: *Balantidium coli*, *Blastocystis* spp., *Cryptosporidium* spp. *Encephalitozoon intestinalis*, *Entamoeba histolytica*, *Enterocytozoon bieneusi*, *Giardia intestinalis*, *Toxoplasma gondii* y algunas otras especies de coccidias como *Cyclospora cayetanensis* y *Cystoisospora belli*.

La transmisión de protozoos que viven en el intestino humano a otro ser humano generalmente ocurre por la vía fecal-oral (por ejemplo, alimentos o agua contaminados o

contacto de persona a persona). Los protozoos que viven en la sangre o tejidos humanos suelen ser transmitidos a otros seres humanos mediante un artrópodo vector, como la picadura de un mosquito (Gobierno USA, 2010). Los ooquistos de *Cryptosporidium* spp. permanecen viables en el agua hasta por 140 días, y son resistentes a la mayoría de los desinfectantes convencionales, lo que dificulta mucho e incluso impide su destrucción por un proceso convencional de cloración. La irradiación de luz UV es eficaz contra *Cryptosporidium* spp. aunque algunos brotes mundiales de criptosporidiosis ocurren por la contaminación de cuerpos de agua superficial, subterráneas y recreacionales con ooquistes del protozoario, así como otros casos más frecuentes por contaminación de agua en plantas de tratamiento de aguas residuales municipales (PTARM) en grandes ciudades (Ríos-Tobón et al., 2017).

5.1.4 *Helminths*

El término helminto es un sinónimo de *verme* o gusano, no taxonómico, que se usa para referirse a especies animales de cuerpo largo o blando que infestan el organismo de otras especies. Como no es un grupo taxonómico, sino un concepto ecológico y médico, no se pueden generalizar las características de los helmintos más allá de lo que es común a los gusanos: ser de forma alargada y blandos, sin un esqueleto que estructure el conjunto de su cuerpo. Los helmintos incluyen diversos grupos, como: anélidos (gusanos segmentados), nematelmintos (cilíndricos) y platelmintos (planos). No obstante, los grupos que han sido de interés se constituyen principalmente por cestodos, tremátodos, nematodos, acantocéfalos, que son los que infectan a los seres humanos, siendo el huevo del organismo adulto el que ingresa al organismo. Los huevos no causan patologías, para hacerlo se requiere que se encuentren en sus fases siguientes, tal como estado larvario, o bien en su estado adulto. Lo anterior ocurre cuando las condiciones son favorables y sintetizan una enzima que les permita disolver las capas protectoras y por consiguiente convertirse en larva. Al eclosionar la larva puede atravesar la pared intestinal y viajar por el torrente sanguíneo. Si bien, algunas larvas mueren en el trayecto debido a que las condiciones no son favorables para la supervivencia, algunas de ellas forman quistes en riñones, vejiga, apéndice, páncreas o hígado produciendo daño y requiriendo extirpación quirúrgica (Gobierno USA, 2010). En el caso de que la larva alcance la madurez necesaria, se convierten en gusanos adultos que viven en el intestino, donde producen miles de huevos cada día. Esta situación se denomina helmintiasis y se nombra de acuerdo al helminto que lo causa. La helmintiasis afecta principalmente a infantes produciendo retraso del crecimiento, disminución de la aptitud física, hemoglobina, concentración y/o coeficiente intelectual más bajo (Jiménez, Maya y Galván, 2007). Los HH Son altamente resistentes a los cambios de temperatura, humedad y pH en el ambiente externo, pueden durar largos períodos de tiempo en el ambiente externo ya que cuentan con varias capas (de tres a cinco) que funcionan como protección ante el estrés ambiental y químico (Magaña, 2018). Las ventajas de establecer una especie de helminto como bioindicador, son su resistencia, su fácil identificación por laboratorio y su prevalencia. Los principales helmintos patógenos transmitidos por el agua son *Ancylostoma duodenale*,

Ascaris lumbricoides, *Necator americanus*, *Paragonimus* spp., *Schistosoma* spp. y *Trichuris trichiura* (Ríos-Tobón et al., 2017).

Las técnicas analíticas para enumerar los HH se pueden clasificar en dos: directas e indirectas. En el primer caso consiste en separar, recuperar y concentrar los HH de la muestra. En el segundo, se identifican los HH y se cuentan visualmente usando un microscopio y una cámara Doncaster o Sedwig-Rafter. Los HH no se pueden inactivar con cloro, luz ultravioleta u ozono, que son los procesos utilizados convencionalmente para desinfectar. Es posible separarlos del agua y trasladarlos a los lodos activados mediante los procesos de coagulación, floculación y sedimentación en tratamientos de aguas residuales. En este caso, los HH permanecen viables hasta que el lodo residual se somete a una estabilización térmica por encima de los 40° C para inactivarlos (Jiménez, Maya y Galván 2007).

La norma oficial mexicana NOM-001-SEMARNAT-1996 considera a los huevos de helminto (HH) como indicadores de los LMP y la NOM-003-SEMARNAT-1997 establece como LPM ≥ 1 HH/L para aguas que se reúsen en servicios al público, sin embargo, la cantidad de huevos viables que se requiere para inducir una parasitosis es de 1, por lo que el cumplimiento de estas normas no garantiza la inocuidad del agua y una potencial infección.

5.1.5 Enfermedades emergentes

La palabra enfermedad deriva del latín *infirmitas*, *infirmatis* que significa debilidad, flaqueza, la OMS la define como "Alteración o desviación del estado fisiológico en una o varias partes del cuerpo, por causas en general conocidas, manifestada por síntomas y signos característicos, y cuya evolución es más o menos previsible" (Herrero, 2016). El término emergentes se debe a que enfermedades conocidas anteriormente y supuestas bajo control tratadas con eficiencia, recientemente han adquirido un carácter epidémico, se convierten en amenaza, ocurren en regiones en las que antes no existían y cuya frecuencia o mortalidad se encuentra en la actualidad en constante aumento. Este tipo de diseminación se presenta frecuentemente como consecuencia de cambios ecológicos derivados de factores sociales o demográficos, o bien como consecuencia de avances tecnológicos. Los cambios globales, como el desarrollo humano, el crecimiento y movimiento demográfico y el cambio climático ejercen presiones sobre la calidad y cantidad de los recursos hídricos, que pueden influir en el riesgo de enfermedades de origen hídrico (EOH). En particular, los agentes patógenos zoonóticos plantean los mayores desafíos para garantizar la seguridad del agua de consumo humano y de las fuentes de agua a corto y mediano plazo. En las tres últimas décadas se han identificado una serie de enfermedades catalogadas como emergentes y reemergentes que comparten factores de riesgo relacionados entre sí, debido a las transformaciones realizadas por el hombre durante el antropoceno se resumen en la Tabla 5.2.

**Tabla 5.2 Enfermedades emergentes, reemergentes
y los factores de riesgo relacionados.**

(Elaborada con datos obtenidos de Lysaght, 2016; Kuri-Morales, 2015; Kershenobich, 2007; Riverón, 2002; Durich, 2000; Suárez y Berdasquera, 2000)

Origen	Enfermedad	Factores de riesgo
Bacteriano	Campilobacteriosis	Cambios demográficos
	Esquistosomiasis	Migración
	Cólera	Comercio global
	Neumonía por <i>Legionella pneumophila</i>	Viajes internacionales
	Úlcera péptica por <i>Helicobacter Pylori</i>	Saneamiento insuficiente
	Criptosporidiosis,	Guerras o conflictos
	Ciclosporiasis	Cambios de comportamiento
	Malaria	Revolución sexual
	Giardiasis	Adicciones
	Tuberculosis	Aglomeraciones
	Colitis hemorrágica por <i>Escherichia coli</i> cepa 0157:H7	Nuevas tecnologías
	Síndrome de shock tóxico estafilocócico.	Presas
		Deforestación
		Contaminación ambiental
		Adaptación Bacteriana
Viral	VIH	Cambio climático
	Ébola (EVE)	Deficiencia en la implementación de las medidas de salud pública
	hepatitis B y C	Alimentos envasados
	Hantavirus	Cambio climático
	Rotavirus	Sequías
	SARS	Inundaciones que contaminan aguas superficiales y pozos.
	Covid-19	
	virus Chikungunya	
	Meningitis	
	Influenza y gripe aviar	

En la tabla anterior se observa que, sin importar el origen de las EOH, el factor común es el impacto que realiza el ser humano sobre la naturaleza con los nuevos productos o nuevas tecnologías que implementa para llevar una vida más confortable. La USEPA (2020) aprobó más de 500 productos desinfectantes de superficies para utilizarse como herramienta para desinfectar superficies y aumente las posibilidades de protegerse a sí mismas y a sus familias contra el nuevo SARS-CoV-2, el nuevo coronavirus que causa COVID-19 junto con indicaciones para su uso, pues al estar al alcance de todos se corre el riesgo de que pocas personas tomen conciencia sobre el cuidado requerido para seguir las indicaciones y la disposición de los envases. La contribución de los cambios políticos migratorios también es importante, pues el ser humano es reservorio para distintos microorganismos, aunque no se desarrolle una patología que lo demuestre y la conectividad mundial a través de aviones, barcos, etc. facilitan su diseminación (Durich, 2000). El cambio climático se manifiesta en el agua a través de las sequías y sobre todo de tormentas e inundaciones que pueden arrasar

suministros enteros de agua o dejarlos contaminados, reduciendo de inmediato la disponibilidad de vital líquido, propagar enfermedades y aumentar la pobreza (Suárez y Berdasquera, 2000).

5.1.6 Indicadores microbiológicos de la calidad del agua

La necesidad de protección de los recursos y el tratamiento del agua para consumo humano se hizo evidente al demostrar la conexión entre las bacterias en el agua y el brote de diversas enfermedades, como la segunda epidemia del cólera en 1848 en Inglaterra. En ella, John Snow publica su hipótesis sobre el modo de transmisión a través de agua contaminada con las excretas de enfermos, que finalmente, terminaban en aguas del río Támesis. Las personas, al beber el agua cruda extraída del río, ingería la "materia mórbida", cerrando de esta manera, un círculo de contagio. También descubrió que las filtraciones de las aguas residuales del alcantarillado que pasaban cerca de la fuente de agua que alimentaba a la bomba de *Broad Street*, ocasionó un nuevo brote de cólera en 1854 (Cerde y Valdivia, 2007).

Un brote de ETA se presenta cuando dos o más personas comparten síntomas de enfermedad en el mismo periodo de tiempo y se relaciona al agua o a los alimentos como el origen de la enfermedad. También se considera un brote cuando existe un caso único en una zona, donde anteriormente a él, no existían casos reportados (OPS, 2021). Las EOH tienen el potencial de presentarse en cualquier lugar del mundo y causar epidemias tanto en países desarrollados como en países económicamente emergentes. En consecuencia, es indispensable vigilar constantemente todas las fuentes de abastecimiento, las plantas potabilizadoras (PP), redes de agua potable, drenaje y plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR). Sin embargo, si se plantea realizar la cuantificación de todos los virus, bacterias, protozoarios, hongos y helmintos potencialmente detectables en cada uno de los puntos a vigilar, las labores de monitoreo se tornarían titánicas en relación a la proporción de muestras que deberían analizarse. Por esta razón se emplean los indicadores microbiológicos (Ríos-Tobón et al., 2017).

Los indicadores microbiológicos de calidad del agua son organismos que tienen un comportamiento similar a los microorganismos patógenos cuya procedencia, concentración, hábitat y reacciones a factores externos representan al comportamiento de la mayoría, luego entonces, su presencia determinaría la existencia de otros patógenos similares. Las semejanzas en su forma de reaccionar a factores externos permiten comparar la forma en que reacciona a cambios inducidos como el pH, la temperatura o a la desinfección por medios físicos o químicos. Un requisito importante para que un microorganismo se convierta en indicador debe ser fácilmente cultivable o identificable en laboratorio y la técnica para hacerlo también debe ser económicamente factible (Ríos-Tobón et al., 2017).

Dado que es prácticamente imposible radicar en un lugar en el planeta que se encuentre lejos de microorganismos las directrices que realice un gobierno o una entidad de salud pueden establecer estas tolerancias. De hecho, las guías promovidas por la OMS,

afirman que el agua potable si puede contener microorganismos patógenos, sólo que, en una concentración tan baja, que el riesgo de contraer infecciones transmitidas por el agua esté por debajo de un límite aceptable en el que la respuesta al patógeno no coloque en un riesgo grave a la salud de la población. Este nivel de riesgo aceptable debe basarse en un consenso de la comunidad y con esta base desarrollar las políticas requeridas en consecuencia. Para determinar la concentración tolerable de un patógeno se requiere conocer la relación dosis – respuesta entre la concentración del agente patógeno y el número de personas infectadas que desarrollen síntomas, entre el número total de personas expuestas. Estas relaciones de dosis-respuesta se han establecido para varios patógenos conocidos, sin embargo, esta detección para indicadores clásicos tiende a fallar en la identificación de nuevos agentes patógenos (FAO, 2018). El creer que es posible realizar el monitoreo de todos los organismos presentes en el agua para consumo humano es poco realista y también lo es aseverar que todos tendrán el mismo comportamiento. Por ejemplo: *E. coli* y *Enterococcus* spp. son mucho menos resistentes al cloro que los ooquistes de *Cryptosporidium* spp, y esto trae como consecuencia que el monitoreo para un grupo de patógenos pueden dar una falsa impresión de seguridad, si otros patógenos sin identificar también están presentes. Los principales bioindicadores establecidos en todo el mundo incluyen coliformes fecales, *E. coli*, y enterococos. Con las tecnologías actuales y diferentes estudios en el mundo, se ha logrado evidenciar la presencia de otros microorganismos, tales como, *Cryptosporidium* spp, *Streptococos* fecales, *Norovirus* y *Pseudomonas* spp, que podrían optimizar el diagnóstico de potabilización en las plantas y sistemas de tratamiento de agua para consumo humano (Ríos-Tobón et al., 2017). El caso específico de los virus plantea serios retos, los adenovirus, astrovirus, calicivirus, enterovirus, rotavirus y el virus de hepatitis A, que son capaces de persistir en el ambiente acuático con la viabilidad de provocar efectos severos en salud, a pesar de que el agua para uso y consumo humano se someta a tratamientos de desinfección. Los virus humanos son más resistentes a dichos tratamientos, que las bacterias coliformes utilizadas como indicadores de calidad de agua a nivel mundial. Estudios sugieren que se deben revisar las normas oficiales mexicanas vigentes: NOM-127-SSA1-1994 sobre agua para uso y consumo humano; NOM-003-SEMARNAT-1997 sobre límites máximos permisibles de contaminantes en agua residual tratada para reúso y NOM-001-SEMARNAT-1996 sobre límites permisibles de contaminantes en aguas residuales que son descargadas en aguas y bienes nacionales y el PROY-NOM-127-SSA1-2017, a fin de incluir a los virus dentro de los parámetros de calidad de agua que se evalúan periódicamente (Espinosa-García et al., 2004).

5.1.7 Contaminación y la agenda 2030 de la ONU

En septiembre del año 2000 se reunió la asamblea general de la ONU, donde los líderes de 189 naciones se comprometieron con el contenido de la Declaración del Milenio que se compone por ocho Objetivos de Desarrollo del Milenio (ODM) que buscaron atender las necesidades humanas más apremiantes y los derechos humanos que todas las personas deberían disfrutar. En ella se establecieron metas e indicadores con el propósito de medir el grado de avance en el cumplimiento de los objetivos, y dar seguimiento a las mejoras en la calidad de vida de cientos de millones de personas rumbo al año 2015. Las metas y los indicadores se han monitoreado de tal modo que, en 2008 se ampliaron a 70 indicadores y en el año 2015 la asamblea general adopta la agenda 2030 para el desarrollo sostenible. Esta agenda se diferencia de los ODM, de acuerdo a los cambios más significativos que refiere la UNICEF, 2020, mencionando los siguientes puntos:

a) Sostenibilidad. El modelo de desarrollo actual es insostenible, ya que está afectando seriamente el futuro de las siguientes generaciones con extracción desmedida de recursos naturales sin retribuirse al ambiente. Si se quiere garantizar la vida, los derechos de las personas y el bienestar del planeta tierra, el modelo a seguir tiene que ser sostenible. Tiene que asegurar que se puede cubrir las necesidades del presente sin comprometer las necesidades de futuras generaciones.

b) Equidad. Los ODM se basaban en promedios nacionales que impedían conocer la realidad de las comunidades más vulnerables y alejadas. Los ODS incluyen un enfoque en el que se tienen en cuenta más parámetros que reflejan mejor la realidad.

c) Universalidad. Mientras los ODM trabajaban las metas solo en los países en desarrollo, la nueva agenda de desarrollo asume que todos los problemas están interconectados y hay que abordarlos desde todos los países.

d) Compromiso. Por primera vez se compromete a todos los países del mundo, en la aplicación de la Agenda 2030 dentro de sus políticas internas.

e) Alcance. Ahora se tienen 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) con 169 metas a alcanzar, a diferencia de los 8 ODM iniciales. Incluye temas fundamentales como el empleo digno o el cambio climático.

Las metas planteadas para cada ODS que se relacionan con la calidad del agua, los impactos de los procesos de desinfección en el cuidado de la salud y los impactos sobre el medio ambiente se resumen en la Tabla 5.3.

Tabla 5.3 Objetivos de Desarrollo Sostenible relacionados con la calidad del agua

(Con información obtenida de la ONU, 2015)

Objetivo	Meta	Relación
 <p>1 FIN DE LA POBREZA</p>	<p>Erradicar la pobreza en todas sus formas.</p>	<p>El acceso al agua potable y saneamiento entre los países más ricos el doble de alta que entre los países más pobres.</p>
 <p>3 SALUD Y BIENESTAR</p>	<p>Poner fin a las epidemias, a las enfermedades transmitidas por el agua y otras enfermedades transmisibles</p>	<p>La desinfección del agua potable y el saneamiento de aguas residuales previene las EOH.</p>
 <p>6 AGUA LIMPIA Y SANEAMIENTO</p>	<p>Mejorar la calidad del agua aumentar el reciclado y la reutilización sin riesgos.</p>	<p>El agua dulce para consumo humano en el planeta es limitada, por lo que indispensable la desinfección para reciclarla y reusarla.</p>
 <p>9 INDUSTRIA, INNOVACIÓN E INFRAESTRUCTURA</p>	<p>Modernizar y reconvertir las industrias para que sean sostenibles, con procesos industriales limpios y ambientalmente racionales.</p>	<p>La creación de nuevos productos o nuevos desarrollos tecnológicos se encuentran vinculados a las EOH, a las enfermedades emergentes y reemergentes.</p>
 <p>11 CIUDADES Y COMUNIDADES SOSTENIBLES</p>	<p>Asegurar el acceso de todas las personas a servicios básicos adecuados.</p>	<p>Todas las ciudades y comunidades deben contar con los servicios básicos de agua potable y de saneamiento</p>
 <p>12 PRODUCCIÓN Y CONSUMO RESPONSABLES</p>	<p>Gestión ecológica de los productos químicos y los desechos, reducir su liberación a la atmósfera, agua y el suelo</p>	<p>La liberación de antimicrobianos y biocidas al agua tiene el potencial de alterar ecosistemas.</p>
 <p>14 VIDA SUBMARINA</p>	<p>Prevenir y reducir la contaminación marina de todo tipo, en particular la producida por actividades realizadas en tierra.</p>	<p>El vertimiento de aguas residuales sin tratar altera las condiciones marinas.</p>
 <p>15 VIDA DE ECOSISTEMAS TERRESTRES</p>	<p>Velar por la conservación, el restablecimiento y el uso sostenible de los ecosistemas terrestres y los ecosistemas interiores de agua dulce.</p>	<p>El 75 % de las nuevas enfermedades infecciosas en humanos son zoonóticas y relacionadas con la salud de los ecosistemas.</p>

El hecho de abrir un grifo y que salga de ahí, agua potable en calidad, cantidad, asequible y segura es una tarea compleja que involucra diversos aspectos y responsabilidades.

El agua se encuentra en el centro del desarrollo sostenible por ser un bien económico y un bien social pues es fundamental para el desarrollo socio-económico de las naciones, de los ecosistemas saludables y para la propia supervivencia humana. El agua debe distribuirse en primer lugar para satisfacer las necesidades humanas básicas y luego para permitir el funcionamiento de los ecosistemas y finalmente para usarse en la economía. (ONU, 2014). Su adecuada gestión, resulta vital para reducir la carga mundial de enfermedades por lo que es necesario establecer los procesos adecuados para su potabilización y saneamiento. El acceso a agua potable segura, con la adecuada gestión de las aguas residuales, disminuye las enfermedades por transmisión hídrica, lo que da como resultado personas sanas y ecosistemas protegidos, que aumentan la prosperidad de la sociedad de forma equitativa y resiliente. En el marco de la pandemia por Covid-19, el agua retomó su importancia fundamental al ser una barrera en el contagio mediante el lavado frecuente de manos y también hizo evidente todas las deficiencias que existen en el cumplimiento del derecho humano al agua (CEPAL, 2020).

5.2 Desinfección convencional de agua

La desinfección es un término relativo, existen diversos niveles de desinfección, desde una esterilización química donde se alcanza la muerte de todas las formas de vida microbianas (incluyendo bacterias y sus formas esporuladas, hongos y virus), hasta el logro de una mínima reducción del número de microorganismos contaminantes. Estos procedimientos se aplican únicamente a objetos inanimados (Vignoli, 2008).

El objetivo de la desinfección es la extracción, desactivación o destrucción de microorganismos patógenos a fin de destruirlos o detener su reproducción. Como resultado de la desinfección se tiene un efecto cinético en la tasa de mortalidad, donde el criterio de muerte de un microorganismo también se puede entender como la pérdida irreversible de la habilidad para reproducirse (Márquez, 2016). Esta etapa es importante en el tratamiento de agua, ya que impide o limita la capacidad de los microorganismos patógenos de producir enfermedad en hospederos susceptibles a ellos. Las aplicaciones de biocidas pueden variar de acuerdo a su uso que se le dará al agua, por ejemplo: el agua para la industria alimentos, farmacéutica o microelectrónica no será la misma que para equipos industriales, potabilización, recreación, control de algas en lagunas o la desinfección de resinas de intercambio iónico, entre otros. (Castro, 2004).

La desinfección es una etapa importante para lograr la inocuidad en el agua de consumo humano a fin de evitar la propagación de enfermedades y también en la desinfección del agua residual tratada antes de su vertido con el objetivo de evitar alteraciones en el ecosistema derivadas de la introducción de microorganismos. Para lograr la eliminación/inactivación de los microorganismos en sistemas acuosos es necesario conocer el tipo de agua inicial y con base en ello elegir entre los medios físicos y químicos que permitan una desinfección eficiente. Las tres opciones básicas para la inactivación de microorganismos son: tratamiento por calor, por irradiación o mediante el uso de productos

químicos. Los dos primeros pertenecen a los medios físicos en los que no se agregan sustancias adicionales y tampoco se cuenta con un efecto residual. Los medios químicos requieren el agregado de sustancias que pueden transformar las propiedades organolépticas del agua y que, en concentraciones inadecuadas tienen el potencial de provocar severos daños a la salud. Estos productos se pueden clasificar en dos categorías: los oxidantes y los no oxidantes. Los primeros contienen elementos altamente oxidantes como el cloro, el bromo, el ozono y peróxidos, actúan destruyendo el material celular de los microorganismos oxidándolo rápidamente de forma irreversible, provocando la pérdida de la actividad enzimática, la hidrólisis de los constituyentes orgánicos y muerte celular. Al ser altamente oxidantes, también son corrosivos, por lo que su manejo requiere medidas adicionales de seguridad y tienden a formar subproductos de reacción que son potencialmente carcinógenos si son consumidos por un tiempo prolongado. Los biocidas no oxidantes generalmente son compuestos orgánicos que pueden trabajar a pH alcalino, interfieren con el metabolismo impidiendo la respiración o la reproducción celular, pueden dañar la estructura de la célula e incluso destruir la pared celular, en su mayoría no son corrosivos, por lo que su acción biocida es más lenta. Los compuestos más empleados son: Amonios cuaternarios, Poliamonios cuaternarios, Fosfonios cuaternarios, Isotiazolonas, Compuestos organobromados, Aldehídos, Compuestos órgano azufrados, Iones metálicos, Clorhidratos de biguanidina. (AQUA-España, 2018; Castro, 2004).

5.2.1 Factores que influyen en la desinfección

El agua tiene la capacidad de disolver sustancias, partículas o gases, materia orgánica, microorganismos y minerales en la escorrentía. A pesar de que el agua tiene la capacidad de auto-depurarse al eliminar los contaminantes mediante procesos biológicos de descomposición o por filtración natural. Dicha capacidad de auto-depuración del agua no es suficiente para uso o consumo humano, pues los microorganismos no son eliminados de manera adecuada, continuando así con su potencial de transmitir las enfermedades descritas en capítulos anteriores. Para que los agentes oxidantes puedan tener efecto biocida, deben primero satisfacer la demanda natural del agua de oxidantes, causada por materia orgánica y por hierro (Fe), manganeso (Mn) y sulfuro de hidrógeno (H₂S). La oxidación del Fe y del H₂S para su remoción del sistema podrían no ser efectivas sin un control efectivo de las bacterias reductoras de sulfatos (*Desulfovibrio desulfuricans*) y de hierro como la *Gallionella spp.*, *Crenothrix spp.* y *Leptothrix spp.* (Castro, 2004). Para lograr la efectiva desinfección del agua, sin importar su origen, es necesario que supere diversos factores como:

- a) *Impurezas del agua*: Esto se debe a los metales solubles, partículas, materia orgánica y otros microorganismos, aumenta la turbidez y reduce la transparencia del agua. Al momento de añadir un desinfectante reacciona con los microorganismos patógenos y también con otras sustancias presentes, por lo que, es preferible someter al agua a diversos procesos y operaciones unitarias, tal como la coagulación-floculación,

sedimentación y filtración para disminuir las impurezas, a fin de aumentar la eficiencia de desinfección y reducir la demanda de desinfectante (Lenntech, 2021a; Valades, 2021).

- b) *Concentración del agente desinfectante*: Se requiere una cierta concentración de agente desinfectante (demanda) para reaccionar con las diversas sustancias presentes, antes de realizar la desinfección y además de requerir una concentración residual de desinfectante. Por lo tanto, la concentración total de agente desinfectante necesaria en el agua es igual a la concentración necesaria para satisfacer la demanda de agente desinfectante en función de las propiedades del agua aunada a la concentración necesaria de desinfectante residual (Lenntech, 2021a; Valades, 2021).
- c) *Concentración inicial de la población microbiana*: el número de organismos objetivo al inicio y los que se desea eliminar o tener al final del proceso, porque a mayor número de microorganismos, mayor deberá ser la concentración del agente y su tiempo de exposición al mismo (Vignoli, 2008).
- d) *Tiempo de contacto con el agente desinfectante*: La concentración residual debe mantenerse el tiempo de contacto necesario para inactivar a los microorganismos objetivo. El tiempo de contacto se utiliza normalmente para determinar la forma en que afecta un desinfectante a un tipo de microorganismo bajo condiciones específicas. Existen diferencias sobre la afectividad relativa de ciertos desinfectantes químicos en función del tipo de microorganismo (Lenntech, 2021a; Valades, 2021).
- e) *Tipo de microorganismo*: Los desinfectantes pueden eliminar de manera efectiva una variedad de microorganismos patógenos como virus, bacterias y parásitos, sin embargo, algunos de éstos son resistentes a los desinfectantes, como el caso de la Bacteria *E. coli*. Se debe tomar en cuenta que la ausencia de esta bacteria, no significa que el agua sea apta para su consumo. Existen algunos virus o protozoarios, tal como como *Cryptosporidium* spp. y *Giardia* spp. que son más resistentes al cloro que la *E. coli*, donde la edad para algunos organismos resulta ser un factor a considerar. Las bacterias jóvenes son más fáciles de matar que las adultas debido a que las bacterias desarrollan una capa protectora de polisacáridos en la pared celular que las hace resistentes a los desinfectantes (Lenntech, 2021b). La eficacia de cada agente depende también de las propiedades características de cada microorganismo contra el cual se aplica, así, el tipo de pared, la presencia de esporas, la fase de desarrollo, entre otros, modifican la resistencia (Vignoli, 2008).
- f) *Temperatura*: La elevación de la temperatura tienen un marcado efecto sobre todos los microorganismos, ya que tienden a desnaturalizar las proteínas y la hidrólisis de otros componentes, derivando así en la lisis del organismo. En general, la mayoría de las bacterias mueren entre los 40 y los 100 °C, mientras que las algas, protozoarios y hongos lo hacen entre los 40 y los 60° C (Solsona, 2002). La temperatura también influye la afectividad de los desinfectantes, ya que dicho aumento produce un incremento de la

velocidad de las reacciones y por consiguiente de la desinfección. No obstante, dicho fenómeno también puede provocar la volatilización o inactivación del agente desinfectante resultado adverso a la desinfección (Lenntech, 2021a).

- g) *pH*: Las bacterias son altamente susceptibles al a éste parámetro, donde los virus sobreviven algunas horas a $pH < 4$ y $pH > 10$, encontrándose el óptimo alrededor de 7. De igual manera, la actividad de los desinfectantes químicos dependerá de las condiciones del medio de disolución. Cada desinfectante presenta un rango de operación en el cual tiene su máxima efectividad, observando que su eficiencia decrece para una misma dosis, tiempo de contacto y temperatura a medida que se aleja de una aplicación en condiciones óptimas (Valades, 2021).

De esta manera, el proceso de desinfección tiene varias limitantes que pueden reducir su eficiencia y aumentar los costos. No obstante, a la fecha se continúa buscando un desinfectante que opere de manera óptima, identificando varios criterios para ello, pues si bien se requiere que cuente con una toxicidad para los microorganismos, también debe mantener la seguridad para los usuarios o consumidores humanos, por mencionar algunos. La tabla 5.4 muestra las características que debería poseer, idealmente, un desinfectante.

Tabla 5.4 Características deseables en un desinfectante
(Con información de Magaña, 2018 y SDC, 2004)

Propiedad	Descripción
Toxicidad	Ser tóxico o letal en ciertas concentraciones que no sean perjudiciales o interfieran en usos posteriores.
Amplio espectro	Inactiva bacterias Gram positivas y negativas, virus, hongos, protozoarios, helmintos y sus huevos, entre otros.
Toxicidad a temperatura ambiente	Ser efectivo en el intervalo de temperatura ambiente
Toxicidad para otros organismos y medio ambiente	Toxicidad limitada, sin llegar a la letalidad para otros organismos en las dosis empleadas. Es la inocuidad del producto frente al medio ambiente.
Biodegradabilidad	Se define como el porcentaje de degradación del producto en la unidad de tiempo.
Solubilidad	Tener una solubilidad adecuada de acuerdo a los mecanismos de acción ya sea en el agua o directamente en el tejido celular. De este factor depende directamente la interacción con los microorganismos.

Tabla 5.4 Características deseables en un desinfectante
(Con información de Magaña, 2018 y SDC, 2004)

Propiedad	Descripción
Estabilidad	El poder germicida debe mantenerse por un periodo de tiempo, con una concentración razonable en el agua ya desinfectada para proveer una protección residual contra otras posibles contaminaciones antes de su reuso. No debe modificar el pH considerablemente.
Homogeneidad	La disolución debe ser uniforme en su composición y soportar posibles fluctuaciones de composición y concentración con acción rápida y sostenida.
Interacción con materia ajena	No debe ser absorbido por otra materia diferente a las células objetivo, ni tener efectos adversos sobre los materiales en los que se aplica o que entran en contacto con el mismo.
No corrosivo y no colorante	No debe atacar a los metales que pongan en riesgo la conducción del agua se realizada por tuberías metálicas. No debe agregar coloración al agua.
Capacidad desodorante	Al mismo tiempo que realice la desinfección, se eliminan bacterias causantes de olores los cuales podrían desagradar al usuario.
Tiempo de acción	Tiempo de exposición requerido para que el producto cumpla con el objetivo.
Disponibilidad	Debe estar disponible en grandes cantidades ya un precio razonable.
Manejo y transportación	Debe ser seguro, fácil de almacenar, transportar, manipular, preparar y aplicar.
Determinación de concentración	Su presencia y cantidad deben ser cuantificadas de forma fácil, rápida y económica.
Económico	Determinado de acuerdo a su relación coste/eficacia. El costo debe evaluarse en relación con la dilución, el rendimiento y la seguridad.

El desinfectante ideal debe cumplir con diversas características que son contrapuestas, es decir, tóxico y al mismo tiempo seguro y manejable, altamente reactivo

para emplear pequeñas dosis y a la vez no corrosivo, ser de amplio espectro y tener límites sobre la interacción con la materia circundante.

5.2.2 Medios físicos

Un agente físico es una forma de energía presente en el entorno que tiene capacidad de interactuar con la materia produciendo diferentes cambios que pueden ir desde una modificación sustancial de la misma, hasta un cambio momentáneo en su estado. Un cambio de temperatura por la adición de calor puede impactar a organismos sensibles resultando en su eliminación. El agua caliente a la temperatura de ebullición, destruye las principales bacterias causantes de enfermedades que no formadoras de esporas, siendo empleado en la industria alimenticia y de bebidas, pero su aplicación al agua potable o residual no es factible debido al alto coste que supondría (CIDTA, 2018).

La radiación ultravioleta (UV) es un tipo de radiación no ionizante, capaz de inactivar la mayoría de los patógenos (bacterias, virus, helmintos, entre otros) que pueden estar presentes en el agua sin agregar un reactivo químico como los agentes oxidantes (Monge et al., 2018). El ozono catalizado con luz UV con una longitud de onda de 254 nanómetros (nm) produce peróxido de hidrógeno que en presencia de la luz ultravioleta produce radicales hidróxilo (OH⁻) que es un oxidante más poderoso (Castro, 2004). La radiación solar (UVA) también puede ser empleada, el proceso de desinfección solar o SODIS (por sus siglas en inglés) consiste en la desinfección por exposición a luz solar. La eficacia de este proceso depende directamente de la penetración de la radiación en el agua (Spuhler y Meierhofer, 2020).

Los agentes físicos también incluyen medios mecánicos como la filtración. En este medio de separación los microorganismos no son destruidos, sino simplemente retenidos por un material filtrante y son retirados del agua que finalmente va a consumirse o emplearse en otros usos. Sin embargo, para lograr la desinfección del agua con este medio son empleados filtros con poros que se azolvan y un consumo de energía eléctrica para desazolvarlos o para ejercer presión suficiente para que el proceso se lleve a cabo. La ultrafiltración puede retener partículas de 0.001 – 0.1 µm en un fluido y como se ha mencionado con anterioridad, virus y bacterias pueden ser retenidos de esta manera y dejar el agua en condiciones aceptables. Sin embargo, al separar los microorganismos del agua, de no contar con otras acciones que los eliminen por completo, seguirán activos en el filtro.

5.2.3 Medios químicos

Los desinfectantes más ocupados son los productos químicos oxidantes, de los cuales el cloro es el más universalmente empleado en agua potable, aunque también se ha utilizado para la desinfección del agua residual, al igual que el bromo y el yodo. Los agentes “no

oxidantes” usan diferentes mecanismos en su acción biocida. Generalmente realizan un envenenamiento lento de las células que alteran su metabolismo. Algunos ejemplos son sulfato de cobre, fenoles clorados, óxido de tributil estaño, compuestos de amonio cuaternarios, compuestos organosulfurados como el metilbistiocianato, ditiocarbamatos, la propianamida de dibromo nitrilo y otros (Castro, 2004). También se ha empleado la variación del pH en el agua para convertirla en ácida o alcalina para la destrucción de bacterias patógenas, ya que el agua con pH inferiores a 4 o superiores a 10 es relativamente tóxica para la mayoría de las bacterias (CIDTA, 2021). De entre los POA para desinfección destaca el ozono, que es un desinfectante que tiene la facultad de mejorar las características organolépticas del agua, por lo que, su uso va en aumento. Es un gas mucho más inestable que el cloro, pero reacciona 3,125 veces más rápido bajo las mismas condiciones y su efectividad biocida cubre un mayor rango de microorganismos que los compuestos clorados. Se puede utilizar para la mineralización o eliminación de carbono orgánico total, aunque en muchos casos implica el uso de altas dosis de ozono y el encarecimiento del proceso. Generar el ozono es caro en comparación con los costos derivados de la obtención de cloro y sus derivados, además de que el gas liberado por las cámaras de contacto de ozono excede el límite establecido de 0.1 ppm, por lo que el ozono restante se tiene que reciclar o destruir, pues es considerado como un gas dañino para la salud a concentraciones de 0.25 ppm en el aire (resultando extremadamente peligroso a concentraciones iguales o mayores de 1 ppm; Castro, 2004). Esta situación implica que el rendimiento energético de la generación de ozono es muy bajo y desaparece por lo general en minutos, sin dejar un valor residual en el agua (CONAGUA, 2019a).

5.2.4 *Uso de metales como desinfectantes*

Dentro de los métodos y agentes no convencionales se encuentra el uso de los metales como agentes desinfectantes que se conoce desde civilizaciones antiguas como la griega y la romana, donde su uso era mayormente atribuido a la serendipia y a supersticiones. En Davey y Etris (1997) sugieren que la acción desinfectante del metal se debe a la liberación de iones y la interacción a nivel proteico, enzimático y genético dentro de los microorganismos (Magaña, 2018). El fenómeno de desinfección puede derivarse de dos acciones:

- 1) la muerte del microorganismo o,
- 2) la inactivación que le impide reproducirse debido a las propiedades bacteriostáticas y oligodinámicas de algunos metales.

Entre los metales con dicho efecto se cuentan: la plata, el cobre, el hierro, el estaño, el mercurio y el bismuto. A continuación, se describirán los metales más usados con el propósito de desinfección y sus mecanismos de acción.

Plata: El mecanismo de acción de la plata sobre las bacterias inicia con su unión a la membrana celular, proteínas de membrana y los ácidos nucleicos cargados negativamente,

bloqueando las cadenas respiratorias, generando especies reactivas de oxígeno, que conducen a cambios funcionales en la célula, hasta destruirla (Echeverry-Chica et al., 2020).

Químicamente, la plata en forma Ag^{+1} reacciona particularmente con los grupos amino ($-\text{NH}_2$), carboxilo ($-\text{COOH}$) o sulfhidrilo ($-\text{SH}$) y al combinarse con oxígeno, alcanza un poder oxidante alto generando especies reactivas de oxígeno (ERO). Aquí se promueve la formación de compuestos complejos con plata que inactivan las enzimas superficiales, interfieren con la respiración del organismo, causan anormalidad en el tamaño celular y alteraciones en el contenido citoplasmático, membrana celular y capas externas. Todas estas acciones se combinan, provocando la muerte celular y eventualmente una citólisis (Magaña, 2018).

Cobre: El mecanismo biocida, tanto el cobre como la plata, se han aplicado durante siglos. Por ejemplo, los vikingos usaban barras de cobre para prevenir el crecimiento de algas en sus embarcaciones y esta utilidad sigue vigente en las pinturas náuticas de la actualidad. Los iones del cobre (Cu^0 , Cu^{+1} y Cu^{+2}) en medio acuoso poseen propiedades bacteriostáticas y oligodinámicas que, tienen la capacidad de causar la muerte a una bacteria o en menor caso impedir su reproducción (inactivación). La muerte celular puede darse por tres vías:

- 1) Los iones del cobre tienen tendencia a formar compuestos coloidales que atraen la fijación de partículas en suspensión con distinta polaridad modificando la permeabilidad de la pared celular y la absorción osmótica.
- 2) los cationes del cobre que logran atravesar la pared celular del microorganismo, interfieren con los cationes presentes en el protoplasma sustituyendo a otros cationes (como el Zinc) y alteran el mecanismo metabólico en su interior. Los lisosomas almacenan el cobre para evitar su toxicidad inmediata, sin embargo, al aumentar la concentración de Cu^{+2} se induce la muerte celular y la autofagia (Castillo, 2016). En ocasiones el cobre se incorpora al plasma, ya que es importante dentro del engranaje metabólico.
- 3) El cobre facilita la hidrólisis y las reacciones de desplazamiento en cadenas de péptidos y ácidos nucleicos, formando quelatos con grupos fosfato dando como resultado la apertura de las cadenas de ADN (Magaña, 2018). Hoy en día está claro que Cu^{+2} tiene una afinidad específica por el ADN y puede unirse y desordenar las estructuras helicoidales por reticulación (*crosslinking*) dentro y entre las hebras (Romero, López y Olea, 2016).

Hierro: Este metal constituye parte esencial del metabolismo pues participa en todos los procesos de óxido-reducción, sin embargo, un exceso resulta tóxico para el organismo debido a su facilidad de promover compuestos tóxicos altamente reactivos. El hierro orgánico (Fe^{+2}) es la forma soluble capaz de atravesar la membrana, pues algunos azúcares y aminoácidos pueden formar quelatos que aumentan su absorción, por ello los organismos cuentan con un mecanismo de regulación que lo libera. Sin embargo, el proceso de liberación

también puede resultar nocivo para el organismo debido al microambiente oxidante y tóxico que genera a su alrededor al combinarse con el oxígeno exterior y generar radicales hidroxilos que promuevan la oxidación de los lípidos de la membrana y otros componentes celulares (Magaña, 2018)

Estaño: El estaño como simple átomo o en molécula no es muy tóxico para ningún tipo de organismo pues es un agente “no oxidante”. No obstante, su forma orgánica es la forma tóxica. Su acción es generalmente un envenenamiento lento de las células, alterando su metabolismo de alguna forma. Los compuestos orgánicos del estaño pueden mantenerse en el medio ambiente durante largos periodos de tiempo pues no son fácilmente biodegradables. Los microorganismos tienen dificultad en romper los compuestos orgánicos del estaño que se han acumulado en aguas del suelo a lo largo de los años, por lo que, las concentraciones de estaño orgánico todavía aumentan siendo la parte superior de la columna de agua su lugar más activo. Hay diferentes tipos de estaño orgánico que resultan en la variación de su toxicidad. El estaño tributílico se usa generalmente para proteger las maderas de los hongos, mientras que el estaño trifenólico es mucho más tóxico para el fitoplancton. Se sabe que el estaño orgánico altera el crecimiento, la reproducción, los sistemas enzimáticos y los esquemas de alimentación de los organismos acuáticos. (Lenntech, 1998; Castro, 2004).

Mercurio: La acción antibacteriana del mercurio y otros metales pesados se basa en su capacidad para reaccionar con los grupos sulfhidrilos de las proteínas para formar sulfuros, anulando de esta forma la actividad enzimática de éstas. Los compuestos inorgánicos de mercurio como el cloruro de mercurio, dicloruro de mercurio, óxidos de mercurio actualmente han caído en desuso debido a su acción irritante para la piel y las mucosas. Sin embargo, los compuestos orgánicos de mercurio como el mercurocromo y el tiomersal) tienen interés para uso tópico por ser menos tóxicos e irritantes (aunque también son menos potentes), por ello se emplean mucho como antisépticos de la piel y heridas por su acción bacteriostática y antifúngica (Bosoquet, 2003).

Bismuto: Los compuestos de bismuto se han utilizado debido a sus acciones astringentes, antiflogísticas, bacteriostáticas y desinfectantes. En dermatología, el subgallato de bismuto todavía se usa en ungüentos y polvos vulnerarios, así como en antimicóticos. Durante el siglo XVIII las sales de bismuto fueron estudiadas para el tratamiento de la sífilis (ver microfotografía de *Treponema pallidum*, germen etiológico de la sífilis) y la gonorrea (*Neisseria gonorrhoeae*). Tras la observación de que el bismuto mostraba actividad frente a *Spirochaeta gallinarum* en pollos, Constantin Levaditi y Robert Sazerac, en el Instituto Pasteur de París, iniciaron la terapia con bismuto para el tratamiento de la sífilis en la década de 1920 (COF Zaragoza, 2018).

5.3 Procesos de oxidación avanzada en desinfección

Los POA encuentran su aplicación principal en el tratamiento terciario, siendo el objetivo de estos procesos eliminar compuestos difícilmente biodegradables por otros métodos y disminuir la contaminación microbiológica. Se basan en procesos fisicoquímicos capaces de producir cambios en la estructura química de los contaminantes, que involucran la generación y uso de ERO poderosas y transitorias, tal como el radical hidroxilo ($\text{OH}\cdot$). Éste radical posee alta efectividad para la oxidación de materia orgánica en condiciones estándar de presión y temperatura, hasta la mineralización completa de estos contaminantes. Debido a la reactividad de estas especies es posible eliminar tanto compuestos orgánicos como inorgánicos, logrando así una reducción de demanda química de oxígeno, carbono orgánico total y toxicidad en el agua residual tratada. Estos procesos se pueden clasificar en fotoquímicos y no fotoquímicos. En el primer caso se necesita una radiación lumínica (UV o UV-vis), mientras que los segundos requieren el uso de compuestos químicos (O_3 , H_2O_2 , Fe^{+2}). Los procesos de desinfección que más se pueden comparar con la fotocatalisis heterogénea del TiO_2 son: la ozonización y la radiación UV, por lo que se muestra un análisis de ventajas y dificultades de cada proceso.

5.3.1 Desinfección con Ozono

El ozono es un compuesto altamente oxidante con la capacidad de degradar compuestos orgánicos e inorgánicos, es una de las ERO más poderosas y se puede producir empleando aire u oxígeno como materia prima. Se puede aplicar en diferentes partes de un proceso de tratamiento de aguas dependiendo de las características de esta, por ejemplo, la pre-ozonización se realiza para eliminar el hierro y manganeso; la Ozonización intermedia se aplica para oxidar a la materia orgánica facilitando su eliminación biológica en los filtros de arena; la ozonización final puede emplearse para dar un pulimento al agua o para degradar contaminantes persistentes. Si bien la aplicación de ozono al agua para desinfección, todos los tratamientos de desinfección tienen ventajas y limitaciones que definen sus campos de aplicación, por lo que se realiza la Tabla 5.5.

Tabla 5.5 Proceso de ozonización en desinfección

(Con datos de Monge et al., 2018 y USEPA, 1999)

Ventajas	Dificultades
<p>El ozono es más eficaz que la utilización del cloro para la desinfección o destrucción de virus y bacterias.</p> <p>Este proceso eleva la concentración de oxígeno disuelto del efluente, mejorando las propiedades organolépticas del agua.</p> <p>Disminuye la demanda química de oxígeno, el carbono orgánico total, color y turbidez en aguas con bajas concentraciones de sólidos suspendidos.</p> <p>La materia prima utilizada es aire u oxígeno que es muy asequible, y sólo requiere un tratamiento previo no muy complejo (filtración, secado).</p> <p>El tiempo en el proceso de ozonización utiliza un período relativamente corto de contacto (aproximadamente de 10 a 30 minutos).</p> <p>Reacciona rápidamente con contaminantes orgánicos e inorgánicos debido a su elevado potencial redox y reactividad</p> <p>No existen residuos peligrosos que necesiten ser removidos después del proceso de ozonización porque el ozono se descompone rápidamente.</p> <p>Después del proceso de ozonización, los microorganismos no crecen nuevamente, a excepción de aquellos que están protegidos por las partículas en la corriente de agua residual.</p> <p>El ozono es generado dentro de la planta, por lo que se reducen los problemas de seguridad industrial asociados con el transporte.</p>	<p>Generar el ozono es costoso y el gas liberado por las cámaras de contacto de ozono excede el límite establecido de 0.1 ppm por lo que el ozono restante se tiene que reciclar o destruir.</p> <p>Es considerado como un gas dañino para la salud a concentraciones de 0.25 ppm en el aire y es extremadamente peligroso a concentraciones iguales o mayores de 1.0 ppm.</p> <p>El rendimiento energético es muy bajo y la concentración de ozono en el gas ozonizado suele ser relativamente baja (2-5% en aire, 3-4 veces más con oxígeno).</p> <p>La baja dosificación puede no desactivar efectivamente algunos virus, esporas o quistes.</p> <p>El proceso de ozonización es una tecnología más compleja que la cloración o la desinfección con luz ultravioleta.</p> <p>De acuerdo al PROY-NOM-127-SSA1-2017, se deben medir los subproductos de la desinfección: Aniones (bromatos, cloratos, cloritos) y carbonilo (formaldehído).</p> <p>La vida media del ozono en el sistema de distribución es de 25 minutos a temperatura ambiente.</p>

El costo de los sistemas de desinfección con ozono depende del fabricante, de la ubicación, de la capacidad de la planta, y de las características del agua a ser desinfectada. Generalmente, los costos del proceso de ozonización son altos en comparación con otras técnicas de desinfección. Debido a que la concentración de ozono generada del aire o del oxígeno es reducida, la eficacia de transferencia a la fase líquida es una consideración económica crítica. Por esta razón las cámaras de contacto utilizadas son generalmente muy profundas y recubiertas (USEPA, 1999).

5.3.2 Desinfección con Radiación UV

El sistema de desinfección con luz ultravioleta (UV) transfiere energía electromagnética desde una lámpara de vapor de mercurio al material genético del organismo (ADN o ARN). Cuando la radiación UV penetra en las paredes de la célula de un organismo, ésta destruye la habilidad de reproducción de la célula. La radiación UV, generada por una descarga eléctrica a través de vapor de mercurio, penetra al material genético de los microorganismos y retarda su habilidad de reproducción ya que rompe los dímeros de Timina. La eficacia del sistema de desinfección con luz ultravioleta depende de las características del agua, la concentración de componentes coloidales y de partículas en el agua, la intensidad de la radiación, el tiempo de exposición de los microorganismos a la radiación y la configuración del reactor.

La fuente de luz UV son las lámparas de arco de mercurio de baja o mediana presión, bien sea de intensidad baja o alta. La longitud de onda óptima para desactivar eficazmente los microorganismos se encuentra en el rango de 250 a 270 nm. Las lámparas de mediana presión tienen una intensidad germicida aproximadamente 15 a 20 veces mayor que las lámparas de baja presión, desinfecta más rápido y tiene más capacidad de penetración debido a su mayor intensidad. Sin embargo, estas lámparas operan a temperaturas más altas con un mayor consumo de energía eléctrica. Existen dos tipos de configuraciones de reactor: de contacto y sin contacto. En el primer caso, la lámpara está recubierta con mangas de cuarzo para minimizar los efectos de enfriamiento del agua y se sumerge. En el segundo caso, las lámparas de luz UV se encuentran suspendidas afuera de un conducto transparente que transporta el agua que va a ser desinfectada. La Tabla 5.6 Muestra las ventajas y dificultades del uso de luz UV en desinfección.

Tabla 5.6 Uso de luz UV en desinfección.

(con datos de Monge et al., 2018 y USEPA, 1999)

Ventajas	Dificultades
La desinfección con luz UV es eficaz para la desactivación de la mayoría de los virus, esporas y quistes.	La baja dosificación puede no desactivar efectivamente algunos virus, esporas y quistes.
Es más un proceso físico que una desinfección química, lo cual elimina la necesidad de generar, manejar, transportar, o almacenar productos químicos tóxicos, peligrosos o corrosivos.	Algunas veces los organismos se pueden auto-reparar o invertir los efectos destructivos de la radiación UV mediante un mecanismo de reparación que cierra las aberturas en la pared celular también conocido como foto-reactivación o “reparación en oscuro”.
No existe ningún efecto residual que pueda afectar a los seres humanos o cualquier organismo acuático.	Un programa de mantenimiento preventivo es necesario para controlar la acumulación de sólidos en la parte externa de los tubos de luz.
Es de uso fácil para los operadores.	La turbidez y los sólidos suspendidos totales en el agua hacen que la desinfección con luz UV sea ineficaz. El uso de la desinfección con lámparas UV de baja presión no es tan efectivo en el caso de efluentes con niveles de sólidos suspendidos mayores a 30 mg/L.
Evita cambios de drásticos de pH en comparación con otros POA, como el proceso de Fenton.	La desinfección con luz UV no es tan económica comparada con la desinfección con cloro, pero los costos de operación son competitivos cuando la cloración requiere de cloración y se cumple con los códigos de prevención de incendios.
Tiene un período de contacto más corto en comparación con otros desinfectantes (aproximadamente de 20 a 30 segundos con la utilización de las lámparas de baja presión).	Se requieren planes de manejo ambiental para el uso y disposición de lámparas a base de vapor de mercurio a fin de evitar daño ambiental.
El equipo de desinfección con luz UV requiere menos espacio que otros métodos.	El consumo eléctrico y la temperatura aumentan con la intensidad de las lámparas de vapor de mercurio de media presión.
Puede ser evitado el uso de tanques de grandes dimensiones, llevando a sistemas de tratamiento más compactos.	

El principal factor de operación en esta técnica es la fuente luminosa en la longitud de onda e intensidad adecuada y subsecuentemente las interferencias que pueda aportar el medio como la turbidez, así como el tiempo de contacto. El mecanismo de “reparación en oscuro” permite a las bacterias ser viables para reproducirse después de la desinfección con UV.

5.3.3 *Desinfección con Fotocatálisis heterogénea empleando TiO₂*

La fotocatalisis emplea radiación UV y/o luz visible como fuerza motriz en el tratamiento de agua, la energía que posee esa radiación debe ser igual o superior a la banda prohibida del fotocatalizador. El proceso consiste en la aceleración de una reacción fotoquímica mediante la presencia de un fotocatalizador sensible a la luz (Nevárez-Martínez, 2018). El instante en que la luz UV ilumina la superficie del fotocatalizador, logra desprender un electrón de él y desplazarlo, generando así los pares electrón-hueco que, a su vez, con el agua del medio, desencadenan más reacciones óxido-reducción produciendo ERO altamente oxidantes que dan lugar a la eliminación de materia orgánica y metales pesados disueltos en el agua. La fotocatalisis se divide en dos tipos de técnicas:

- a) los procesos heterogéneos donde el fotocatalizador es un material semiconductor en estado sólido y
- b) los procesos homogéneos donde el fotocatalizador se encuentra disuelto en agua formando una sola fase.

Dicho proceso se aplica cuando el contaminante por sí mismo no es capaz de capturar fotones, por lo tanto, se requiere el uso de un sensibilizador que absorbe la energía radiante, la transmite y acelera la oxidación. El dióxido de titanio (TiO₂) es el semiconductor más usado en fotocatalisis, debido a que es química y biológicamente inerte, estable a corrosión fotoquímica y química, relativamente abundante y económico. Se encuentra en tres formas cristalinas: brookita, rutilo y anatasa, siendo las dos últimas las más efectivas en tratamientos de aguas. La fotocatalisis heterogénea, es un proceso de oxidación avanzado eficaz, sostenible, que tiene el potencial de aprovechar la energía limpia proveniente del sol para generar ERO altamente oxidantes que se dividen en: primarias y secundarias. Las especies oxidativas primarias están compuestas por el anión radical superóxido (O₂^{•-}) y el radical hidroxilo (•OH) formadas directamente sobre la superficie del fotocatalizador. Las especies oxidativas secundarias se forman por la interacción de las ERO primarias con moléculas de agua formando el radical hidroperóxido (HO₂•) y moléculas de peróxido de hidrógeno (H₂O₂) que también contribuyen en el proceso biocida. Por tales motivos, el uso de fotocatalisis heterogénea para desinfectar agua potable y aguas residuales ha ganado mucha atención (Monge et al., 2018; Malato et al., 2015).

De acuerdo a la teoría de bandas, el proceso fotocatalítico inicia con el contacto de la luz sobre la superficie del TiO₂. Esta luz posee la energía suficiente como para igualar o superar la brecha energética del semiconductor, produciendo la excitación de un electrón y su desplazamiento de la banda de valencia (BV) hacia la banda de conducción (BC). Este desplazamiento deja un hueco de carga positiva en la banda de valencia, por lo que, la partícula de TiO₂ requiere balancear sus cargas y toma a otras especies químicas cercanas que complementen su neutralidad, dando lugar a la formación de especies reactivas tanto en los huecos que quedaron en la banda de valencia y como el desplazamiento de los electrones que migraron hacia la banda de conducción. Los huecos fotogenerados dan lugar a las

reacciones de oxidación, mientras que los electrones dan lugar a las reacciones de reducción (Ungría, 2016). la generación de ERO (ROS por sus siglas en inglés *reactive oxygen species*).

La Figura 5.2 ilustra claramente todo el proceso fotocatalítico. Se observa el inicio de la fotocatalisis con la energía lumínica proveniente de la luz UV, el movimiento de las cargas entre las bandas generando el par electrón – hueco (e-/h+), las reacciones de oxidación (oxidando al contaminante M) y las reacciones de reducción formando las ERO/ROS primarias con moléculas de agua y de oxígeno para formar el radical superóxido y el radical hidroxilo en la superficie del fotocatalizador. Se observa también la formación de ERO secundarias conformadas por el radical hidropéroxido y moléculas de peróxido de hidrógeno que tienen la facilidad de desplazarse en el seno del líquido.

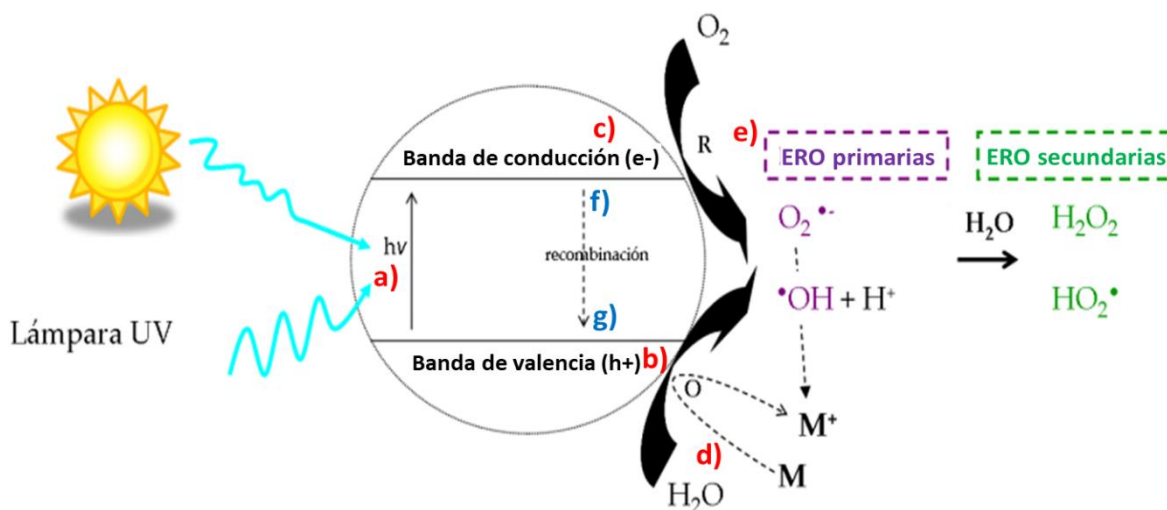
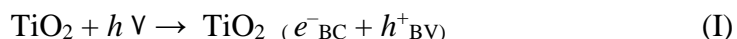


Figura 5.2 Mecanismo de la fotocatalisis heterogénea empleando TiO_2 (Ungría, 2016)

Explicar el mecanismo paso a paso de acuerdo a la figura anterior, con todas las especies involucradas quedaría de la siguiente manera:

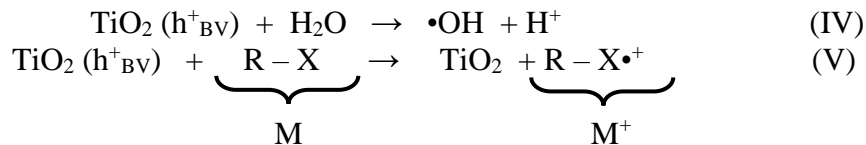
a) La luz que contiene la energía requerida para desplazar al electrón de la BV hacia la BC, irradia la superficie de una partícula del fotocatalizador TiO_2 y se crean pares electrón-hueco (e/h+) o excitones, que pueden migrar a la superficie del fotocatalizador. Esta etapa se lleva a cabo en el orden de femtosegundos.



b) y c) Los pares electrón-hueco quedan atrapados en sitios superficiales. Estos pares reaccionan con las especies adsorbidas previamente o cercanas a la superficie del fotocatalizador. Para que no se produzca la recombinación de los excitones, es importante que exista un oxidante que actúe como aceptor de electrones. Generalmente este papel lo desempeña el O_2 produciendo el radical superóxido ($\text{O}_2^{\bullet-}$). Esta etapa dura entre 100 y 250 nanosegundos.



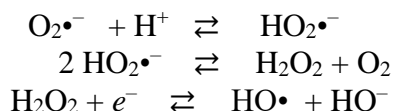
(d) Los huecos que se forman en la BV, reaccionan con especies donadoras de electrones como la molécula de agua o el contaminante M, que se encuentran cerca de la superficie del fotocatalizador o adsorbidos previamente. Se genera el radical hidroxilo ($\bullet\text{OH}$) en el caso del agua y la especie oxidada del contaminante M (M^+). Esta etapa tiene una duración de entre 1 y 100 nanosegundos.



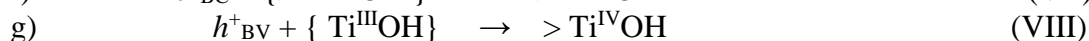
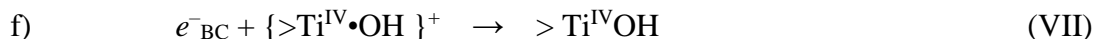
e) Simultáneamente al paso d), los electrones que llegan a la banda de conducción, pueden reaccionar con una especie aceptora como el oxígeno O_2 , dando lugar a radicales $\text{O}_2^{\bullet-}$, que participan adicionalmente en la oxidación de la materia orgánica y pueden generar ERO's secundarias como peróxido de hidrógeno (H_2O_2) y el radical perhidroxilo ($\text{HO}_2\bullet$). Las ERO formadas se ven afectadas por el pH del medio (Higuera y Trisancho, 2006), al igual que las propiedades superficiales del dióxido de titanio, el valor más razonable (y más repetidamente informado en la literatura) para el rutilo y para el Degussa P-25 a 25° C es pH= 6.5 que coincide con el punto isoeléctrico del TiO_2 , por encima de este valor la superficie del fotocatalizador está cargada negativamente y debajo de este punto, se encuentra cargada positivamente (Candal, 2004). El H_2O_2 también puede adicionarse como promotor de oxígeno disuelto. Es un líquido inestable que se descompone en oxígeno y agua con liberación de calor. Aunque no es inflamable, es un potente agente oxidante que puede causar combustión espontánea cuando entra en contacto con materia orgánica. Es un ácido débil que se ioniza fácilmente. En medio alcalino, sigue la reacción hasta la formación del ión perhidroxilo (De la Macorra et al., 2004). Esta etapa (IV) se lleva a cabo en relación de milisegundos.



Formación de ERO secundarias.



f) y g) En competencia con los procesos de transferencia de carga también tienen lugar los procesos de recombinación, en los que, el par electrón-hueco se recombina antes de reaccionar con las especies adsorbidas en la superficie catalítica. La energía necesaria para excitar el dióxido de titanio es de 3,2 eV y como consecuencia sólo es capaz de absorber luz ultravioleta ($\lambda < 385 \text{ nm}$). Los pares hueco-electrón pueden recombinarse o bien desplazarse a la superficie de catalizador. Esta etapa dura alrededor de 10 nanosegundos.



El tiempo mencionado en cada una de las etapas se tomó de Friedmann et al., (2010). Es difícil de creer que todo el proceso de fotocatalisis heterogénea con TiO_2 se lleve a cabo en el orden de milisegundos en toda la superficie del fotocatalizador irradiada, por lo que se ahonda en diversas técnicas para sintetizar al TiO_2 con formas que maximicen la superficie como los nanotubos o nano-alambres. Retardar la recombinación del par e^-/h^+ es uno de los principales temas a estudiar, para ello se han propuesto diversos medios de contención, entre ellos destaca el dopado con fósforo, oro y plata.

Existen dos mecanismos en los que el TiO_2 logra la inactivación de microorganismos. El primero se basa en que los excitones están impedidos para migrar fuera de la superficie del fotocatalizador, por lo que, es indispensable que el microorganismo se encuentre adsorbido previamente y la transferencia directa de un electrón o un hueco al microorganismo, célula o un virus se lleve a cabo. Si las partículas de dióxido de titanio son lo suficientemente pequeñas como para penetrar en la célula, el proceso fotocatalítico podría darse en el interior de ella, ocasionando interferencia en sus funciones vitales y la muerte celular como se observa en la Figura 5.3.

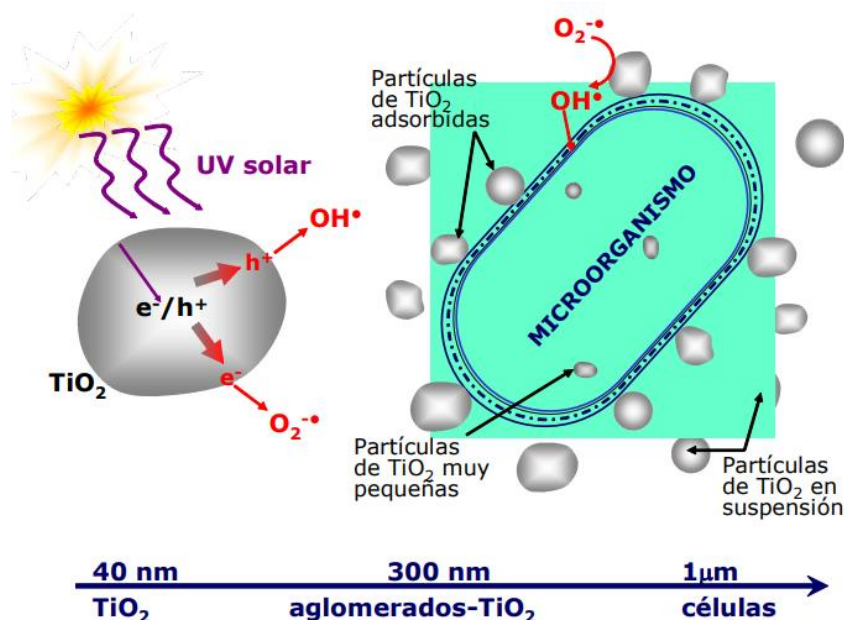


Figura 5.3 Desinfección fotocatalítica con nano partículas de TiO_2 (Fernández, 2005b).

Lograr un posible acercamiento del microorganismo con la superficie del fotocatalizador, la posterior adsorción o penetración de las partículas del óxido a través de la pared celular queda a cargo de la orientación de las partículas y microorganismos debida a su carga eléctrica superficial. La membrana celular tiene carga negativa y la superficie de TiO_2 se encuentra cargada en función del pH. (Fernández, 2005b; Juhua et al., 2021). El pH de un medio acuoso puede cambiar la carga superficial tanto de las bacterias como del fotocatalizador y afectará la interacción electrostática entre ellos. Las células bacterianas están cargadas negativamente debido a la presencia de ácidos teicoicos para bacterias Gram-positivas y lipopolisacáridos y lipoproteínas para bacterias Gram negativas, por lo que, las

bacterias pueden adherirse a la superficie cargada positivamente del fotocatalizador por medio de la fuerza electrostática. Se ha encontrado que los puntos isoeléctricos de las bacterias tanto Gram positivas como Gram negativas están generalmente entre pH 1.5 y 4.5. Cuando el pH está por debajo del punto isoeléctrico, la superficie de las células bacterianas está cargada negativamente y las células se adhieren electrostáticamente a la superficie del fotocatalizador que se encuentra cargada positivamente. Dependiendo del pH, el oxígeno que se une al Ti puede ser sustituido por un grupo OH- para formar TiOH, que reacciona con las ERO fotogeneradas (Rizzo et al., 2014).

El segundo mecanismo de inactivación se basa en las ERO generadas y diseminadas en el medio, éstas reaccionan sobre la superficie de la célula donde son capaces de oxidar su estructura y romper las capas lipídicas (lisis) ocasionando la muerte celular. La segunda forma se lleva a cabo directamente sobre la superficie del fotocatalizador donde se genera el excitón y dan lugar a reacciones de oxidación y reducción. Los radicales $\bullet\text{OH}$ son altamente reactivos y tienen una vida corta después de que ser generados en la superficie de la partícula de TiO_2 . Los iones $\text{O}_2^{\bullet-}$ generados presentan una vida más larga, pero debido a su carga negativa, no pueden penetrar la membrana celular por lo que, interaccionan inmediatamente con la pared externa del microorganismo. El H_2O_2 es menos activo, comparado con los $\bullet\text{OH}$ y $\text{O}_2^{\bullet-}$ sin embargo, sí puede entrar en la célula y activarse con el hierro absorbido, a través de la reacción de Fenton. De hecho, se sabe que, la *E. coli* produce una molécula para captar hierro y contribuye a su absorción en el intestino humano. Los niveles de hierro en la superficie de la célula son considerables y se encuentran en el espacio periplásmico o en su interior, formando complejos de hierro o como parte de proteínas que almacenan hierro, como por ejemplo en la ferritina (Fernández, 2005b).

La Figura 5.4 muestra ambos mecanismos de inactivación bacteriana mediante el fotocatalizador a base de TiO_2 granular donde se muestran las reacciones llevadas a cabo por las ERO y las ocurridas con los huecos en la banda de valencia. Se observa primero la adsorción de las pequeñas partículas del fotocatalizador sobre la pared celular, después, el fotocatalizador es activado por la luz UV cuyo objetivo es eliminar la pared celular de cada bacteria, quitar su protección, y luego dañar su membrana citoplasmática y descomponer el contenido celular dentro de la envoltura celular. Durante este proceso, los compuestos orgánicos tanto de la pared celular como del contenido celular pueden mineralizarse de manera irreversible. Debido a este mecanismo de fotocátalisis, la “reparación en oscuro” realizada por las bacterias después de una deficiente desinfección UV, se eliminan en la desinfección fotocatalítica. Además, debido a que la generación de especies reactivas ocurre en la superficie del fotocatalizador, la interfaz entre el fotocatalizador y el medio acuoso es un lugar crucial donde ocurre la desinfección fotocatalítica, mientras que las ERO pueden atacar bacterias en el seno de la solución a granel. Promover el contacto directo entre las bacterias, el material fotocatalizador y la difusión de las ERO se vuelven importantes para la eficacia de la desinfección fotocatalítica (Juhua et al., 2021; Rodríguez et al., 2020).

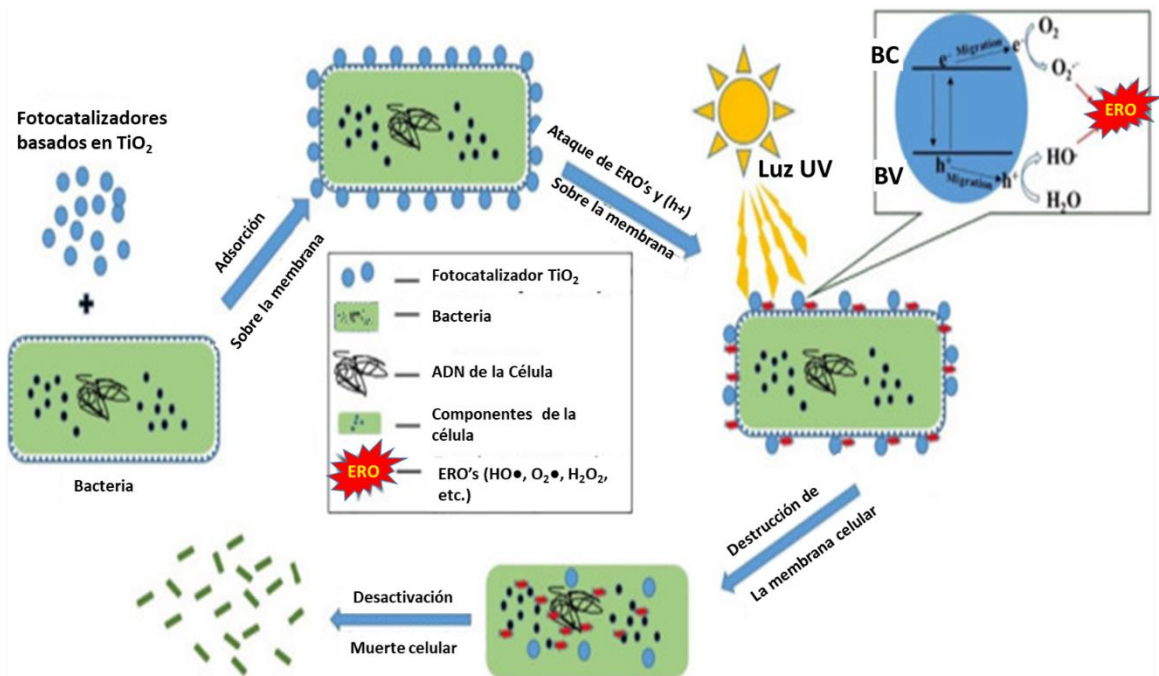


Figura 5.4 Proceso de desinfección fotocatalítica con nano partículas de TiO_2 y ERO fotogeneradas (Juhua et al., 2021).

A pesar de que las minúsculas partículas de TiO_2 podrían tener una mayor eficiencia de desinfección, la utilización del fotocatalizador en *slurry* ocasiona la aparición y aumento de sólidos suspendidos, que es un parámetro limitado por la NOM-001-SEMARNAT-1996, NOM-003-SEMARNAT-1997 y NOM-127-SSA1-1994 mencionadas anteriormente, por lo que es necesario separar las partículas del fotocatalizador de las aguas tratadas antes de su vertido o reutilización, siendo éste uno de los principales inconvenientes debido a su reducido tamaño. Hoy en día se llevan a cabo trabajos de investigación con el objetivo de inmovilizar estos catalizadores en soportes adecuados y evitar que las partículas de catalizador salgan del proceso conjuntamente con el agua tratada. Así, para solucionar este problema, existen diferentes alternativas como aumentar el tamaño de las partículas o adherirlas a soportes de vidrio (Pleskova et al., 2016), estireno de mayor tamaño (Wang et al., 2017) para mejorar la decantación y preferentemente depositarlo sobre las paredes iluminadas del fotoreactor (Monteagudo et al., 2017) o sobre materiales transparentes a la radiación como el acetato de celulosa (Sreeja, y Vidya, 2016). En ocasiones se deposita el TiO_2 en membranas (Juhua et al., 2021), mallas (Jeong et al., 2021) o fijo en silicón (Liu et al., 2021) para eliminar el problema de separación.

5.4 Mecanismos de acción de los desinfectantes

La acción de los desinfectantes se ha pretendido explicar por cuatro mecanismos generales (Magaña, 2016):

- a. *Daño a la pared celular*: El daño o destrucción de la pared celular da lugar a la lisis celular y a la muerte de la célula. Algunos agentes, como la penicilina, inhiben la síntesis de la pared celular de las bacterias.
- b. *Alteración de la permeabilidad de las células*: Los compuestos fenólicos y los detergentes alteran la permeabilidad de la membrana citoplasmática. Estas sustancias destruyen la permeabilidad selectiva de la membrana y permiten que se escapen algunos nutrientes vitales, como el nitrógeno y el fósforo.
- c. *Alteración de la naturaleza coloidal del protoplasma*: El calor, la radiación, y los agentes fuertemente ácidos o alcalinos alteran la naturaleza coloidal del protoplasma. El calor coagula la proteína celular y los ácidos o bases desnaturalizan las proteínas, produciendo un efecto letal.
- d. *Inhibición de la actividad enzimática*: Los agentes oxidantes, tales como el cloro, pueden alterar la estructura química de los enzimas dando lugar a su desactivación.

El objetivo de la desinfección es eliminar a los microorganismos por completo y prevenir su diseminación o, en su defecto, volverlos inviables para su reproducción y eventualmente limitar su crecimiento poblacional, con lo que se obtiene una cinética de desinfección en la que, a lo largo de un tiempo determinado, la población de los microorganismos varía por efecto de los desinfectantes. El conocimiento de este comportamiento cinético es importante para prevenir sobredosisificación del desinfectante. El uso del desinfectante en la concentración apropiada es muy importante, ya que inadecuadas concentraciones pueden resultar en la falta de desinfección y altas concentraciones puede causar problemas de toxicidad y efectos en los materiales circundantes e inclusive en el usuario o consumidor final. De estas cinéticas se puede considerar el tiempo de exposición o tiempo de contacto necesario para la desinfección, como las concentraciones empleadas.

5.5 Cinética de la desinfección

Medir el comportamiento de las poblaciones microbianas frente a diversas condiciones ambientales o tratamientos y de ello obtener una expresión matemática que describa ese comportamiento y además permita predecir el ritmo de inactivación o mortandad de los microorganismos requiere de un trabajo multidisciplinario donde se combinan las matemáticas, la microbiología, la ingeniería y la química. A la expresión matemática resultante, se le conoce como modelo cinético de inactivación y la rama de la microbiología

que pretende conocer este comportamiento se conoce como microbiología predictiva (Ungría, 2016) y describe la forma mediante la cual ocurre la acción del agente.

La desinfección del agua no es un proceso instantáneo, ya que se realiza a una determinada velocidad determinada por factores como el tiempo de contacto, la concentración de desinfectante, el pH y la temperatura del agua. La inactivación se desarrolla mediante diferentes etapas que son características de la interacción entre el agente desinfectante y el organismo que buscará sobrevivir u obtener el menor daño posible. Las velocidades globales de desinfección se han empleado como reacciones, es decir, se han modelado a partir del uso de curvas que relacionan el tiempo de contacto con la sobrevivencia de la población que se ajustan a expresiones de cinéticas químicas simples (Magaña, 2018).

La primera propuesta de un modelo cinético fue formulada por Chick en el año 1908, que trata de explicar el proceso de desinfección como si se tratara de una reacción química de primer orden. Chick supone que la concentración de desinfectante se encuentra en exceso, y por lo tanto el proceso es análogo a una reacción química de primer orden en la que la velocidad de la reacción depende de las concentraciones relativas del desinfectante y los microorganismos. Uno de los problemas que presenta esta ley, es que las desviaciones de su modelo son frecuentes porque, el índice de mortalidad aumenta o disminuye con el paso del tiempo, pero si se integra para formular una relación entre la mortalidad de las bacterias y su respectiva concentración con respecto al tiempo se obtiene la Ecuación I que se conoce como la ley de Chick –Watson.

$$\frac{dN}{dt} = -k * C^n * N \quad \rightarrow \quad \ln \frac{N_t}{N_0} = -k * C^n * t$$

$$\frac{N_t}{N_0} = e^{-kC^n t} \quad (\text{I})$$

Donde:

N es el número de microorganismos en el instante t .

t es el tiempo de contacto.

k es la constante de inactividad que depende directamente del desinfectante, temperatura y pH.

C es la concentración del desinfectante.

n es el número de moléculas de desinfectante necesarias para conseguir la inactivación bacteriana. Este factor empírico n , también se conoce como “coeficiente de dilución” y suele considerarse la unidad.

Esta ecuación expresa que la concentración de microorganismos vivos decrece al aumentar Ct (concentración del desinfectante y el tiempo de contacto), ya que la k es constante. No obstante, las desviaciones respecto a esta ley son frecuentes y se ha comprobado que la cinética de inactivación de los microorganismos, no siempre sigue la

ecuación propuesta. Algunas desviaciones típicas en la desinfección se muestran en la Figura 4.1

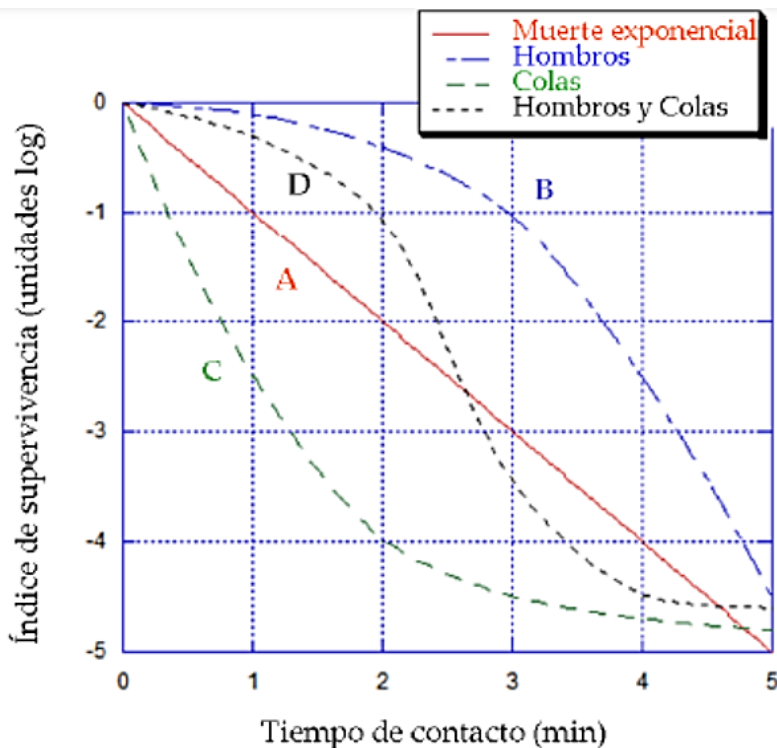


Figura 4.1 Curvas de inactivación típicas (Ungría, 2016).

Al realizar el seguimiento de la concentración de organismos supervivientes y graficarlos contra el tiempo de contacto con el desinfectante, se obtienen diferentes curvas de inactivación al graficar la concentración de organismos viables totales contra el tiempo de desinfección de acuerdo a posibles interferencias que desvían el comportamiento del ideal representada por la curva de inactivación A que responde a una cinética de primer orden o muerte exponencial, donde la velocidad de inactivación es constante e independiente del tiempo de tratamiento. La curva B muestra un “hombro” inicial (*shoulder*) o fase “lag” en la que una fracción de microorganismos supervivientes se mantiene constante en los primeros instantes del tratamiento, seguido un descenso lineal de los mismos y puede deberse a una mezcla inadecuada del desinfectante en la muestra, un retraso en la difusión del desinfectante a los puntos de acción bacterianos o a una resistencia de los microorganismos al ataque del desinfectante. La curva C se caracterizan por una fase de inactivación lineal rápida, seguida de una disminución de las poblaciones lenta, lo que se traduce en la formación de una cola o *tailing-off*, que puede deberse a agrupaciones de microorganismos, a subpoblaciones con una resistencia al desinfectante, o puede deberse a que se existe una disminución en la concentración del desinfectante durante el tratamiento. Finalmente, la curva D presentan ambas desviaciones lineales, mostrando una fase inicial de hombro seguida de una fase lineal de inactivación y finalizando con un fenómeno de cola con curvas sigmoideas (Ungría, 2016).

Sin duda, el comportamiento de las poblaciones microbianas frente a la acción de un agente desinfectante no obedece a un modelo matemático específico, como podría esperarse de sustancias inanimadas o los reactivos químicos en una reacción. La injerencia de diversos factores hace que cada experimentación arroje resultados diferentes. Por esta razón se han empleado diferentes modelos matemáticos y estadísticos para describir el proceso de desinfección. A continuación, se efectúa una síntesis de los modelos cinéticos más empleados en la Tabla 5.7 en desinfección.

Tabla 5.7 Modelos cinéticos empleados en desinfección

(con información de Magaña, 2018; Ungría, 2016)

Modelo	Relación de sobrevivientes	Observaciones
Chick – Watson	$\ln \frac{N_t}{N_0} = -kC^n t$	Se ajusta a una ecuación de primer orden cuando n=1. Este modelo puede describir las curvas A y D de la figura 5. m es una constante empírica del modelo y si m>1 la curva presenta un “hombro” inicial, si m<1 se observa un efecto de cola o <i>tailing-off</i> .
Hom	$\text{Log} \frac{N_t}{N_0} = -kC^n t^m$	Este modelo asume que las poblaciones microbianas son de carácter heterogéneo. El parámetro δ es “tiempo de la primera reducción del primer ciclo logarítmico decimal de la población bacteriana”. Cuando p > 1, la curva es convexa, p < 1, es cóncava. Si p = 1, la es lineal de primer orden.
Modelo Weibull	$\text{Log} \frac{N_t}{N_0} = -\left(\frac{t}{\delta}\right)^p$	
Modelo bifásico	$\text{Log}[Pe^{-k_1 t} + (1 - P)e^{-k_2 t}]$	Se basa en la existencia de dos poblaciones microbianas que presentan una sensibilidad diferente al tratamiento, siguiendo en ambos casos una cinética de inactivación de primer orden.
Racional	$-\frac{\log[1 + N_0^{x-1}(x - 1)kC^n t]}{(x - 1)}$	Tiene la capacidad de describir el fenómeno del “hombro” para x<1 y la fase de decrecimiento para x>1.
Ley de poder de Hom	$-\frac{\log[1 + N_0^{x-1}(x - 1)kC^n t^m]}{(x - 1)}$	Provee un mejor ajuste para microorganismos con curvas de sobrevivencia de tipo C.

Tabla 5.7 Modelos cinéticos empleados en desinfección

(con información de Magaña, 2018; Ungría, 2016)

Modelo	Relación de sobrevivientes	Observaciones
Selleck	$-n \log \left[1 + \frac{Ct}{k} \right]$	Modelo empírico para la desinfección con cloro en aguas tratadas, describe las curvas de sobrevivencia.
Múltiples objetivos	$-\log[1 - (1 - e^{-kCt})^{n_c}]$	Modelo estadístico. Propone que cada microorganismo tiene objetivos críticos idénticos (n_c) que deben ser tocados una vez para ser inactivados. Modelo donde se idealiza el daño que ocasiona el desinfectante a los microorganismos, suponiendo una serie de reacciones sucesivas para inactivarlos. “ l ” es el número de reacciones o eventos letales y K es la velocidad de destrucción.
Series de eventos	$\frac{-kCt + \ln \left[\sum_{K=0}^{l-1} \frac{(kCt)^K}{K!} \right]}{\ln(10)}$	Se basa en el modelo anterior donde se supone una serie de reacciones de primer orden con respecto a la concentración. Por ello se requieren “ l ” eventos letales para inactivar a un organismo.
Múltiples series de eventos	$\log \left[1 - \left(1 - e^{-kCt} \sum_{K=0}^{l-1} \frac{(kCt)^K}{K!} \right) \right]$	Este modelo refiere tres zonas en una gráfica: Hombro, seguida de una fase lineal de inactivación y finalizando con un fenómeno de cola con curvas sigmoideas.
Modelo de Hom modificado	$\log \frac{N}{N_0} = I^\alpha k_1 [1 - \exp(-k_2 t)]^{k_3}$	N y N_0 son las concentraciones bacterianas (UFC/mL) en el tiempo. t es el tiempo en minutos y el punto de partida, $\log N/N_0$ es la tasa de supervivencia logarítmica k_1, k_2 y k_3 son las constantes empíricas independientes de la ecuación. I^α representa la correlación de los efectos de la intensidad de la luz. I es el parámetro de la intensidad de la luz y α es el coeficiente de absorción del fotocatalizador.

Para obtener los coeficientes cinéticos de cada modelo descrito anteriormente, es necesario que los valores experimentales se ajusten a las ecuaciones mediante técnicas de regresión no lineal.

Como es posible observar, a la fecha no se cuenta con un modelo único que describa el comportamiento cinético de la desinfección, dado que las características del desinfectante y del organismo son diferentes en cuanto al mecanismo de acción del agente sobre cada grupo de organismos (virus, bacterias, protozoarios y hongos), al ser diferentes en biología y comportamiento. Los microorganismos tienen motilidad propia, además de la capacidad para desarrollar sus propios mecanismos para neutralizar el poder del agente desinfectante, como es el caso de las bacterias y sus genes de resistencia GRA. Por esta situación es indispensable continuar con los estudios de diferentes técnicas de desinfección.

6. METODOLOGÍA

El presente trabajo se realizó con base en el manual de revisiones sistemáticas, sugerido por la Colaboración Cochrane y su declaración PRISMA 2021. El objetivo del manual es proveer de un método estructurado a los investigadores que buscan reunir toda evidencia científica que responda a un criterio de elegibilidad previamente establecido. Su finalidad es, orientar un tema específico de investigación en las áreas de la salud que ayude a tomar decisiones sanitarias bien fundamentadas. La declaración PRISMA 2021 provee una guía que permite identificar, seleccionar, evaluar y sintetizar estudios. Provee, además, un diagrama de flujo que describe el flujo de información a través de las diferentes fases de la revisión sistemática. Los resultados de la investigación se presentan mediante la ejecución de un meta-análisis documental, donde se combinan los resultados de varias publicaciones que responden a la misma pregunta de investigación minimizando el sesgo y los conflictos de interés.

La Figura 6.1 muestra el tratamiento al que se sometió la información recabada, en conjunto con las fases del modelo Cochrane Prisma y la estrategia seguida por la investigación de este trabajo.

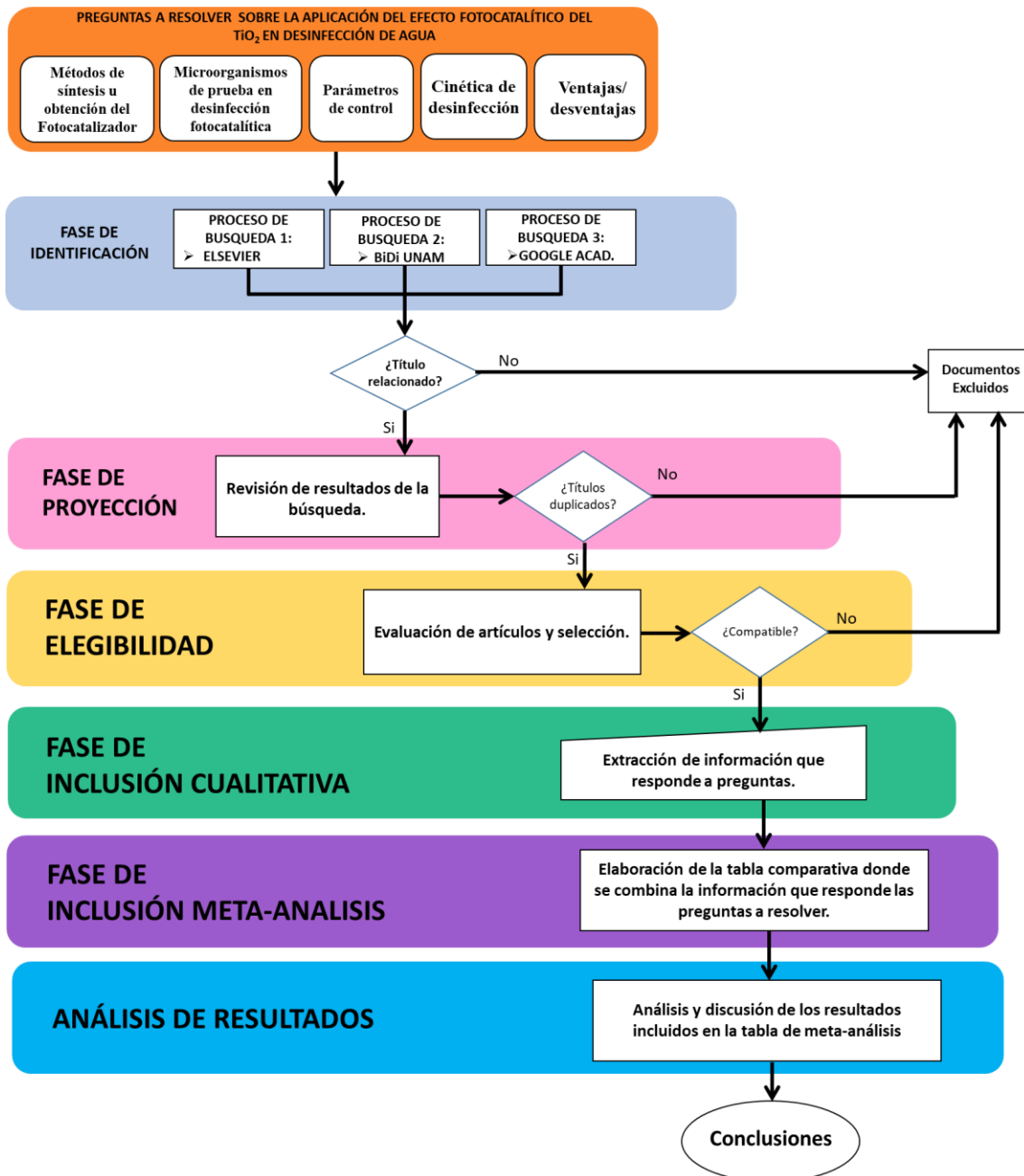


Figura 6.1 Diagrama de flujo que representa las fases de la investigación basada en el modelo Cochrane (2021), elaboración propia.

De acuerdo a la Figura anterior, es posible identificar las diversas fases a los que se sometió la información y que a continuación se desglosan:

6.1 Identificación

En esta etapa se localizaron los documentos científicos relacionados con la desinfección fotocatalítica por medio motores de búsqueda especializados con las palabras clave que para el siguiente estudio se emplearon: agua, desinfección, fotocatalisis,

microorganismos, TiO₂, virus, *disinfection, heterogeneous, photocatalysis, water*. Dado que, el objetivo de la investigación se centró en concentrar el reciente conocimiento acumulado en el desarrollo de nuevas técnicas de desinfección en agua para establecer el estado del arte, se seleccionaron tres motores de búsqueda con amplios acervos documentales que abarcan las áreas de: Ciencias Biológicas, Químicas y de la Salud además de las Ciencias Físico-Matemáticas e Ingenierías, que corresponden a las más populares a nivel mundial y nacional, respectivamente, los cuales son:

a) Plataforma Elsevier: Permite acceso a artículos revisados y publicados en *ScienceDirect*, que, a su vez da acceso al 25% de la producción científica, tecnológica y médica mundial. *Engineering Village* que brinda acceso a diversas bases de datos especializadas en ingeniería, física, geociencias, petróleo y gas, con el apoyo estadístico de *Scopus* que indica los artículos más recientes y más citados sin duplicidad.

b) BiDi UNAM: Su servicio de consulta permite el acceso a Tesis de diversos grados de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), libros electrónicos, revistas y otras bases de datos. Es la biblioteca digital en alianza con 4000 sellos editoriales, que consolidan el catálogo más amplio y diverso del mercado.

c) Google Académico: Es el buscador con más amplitud de información ofrece publicaciones de SciElo, ReserachGate, trabajos de Tesis de diversas universidades, desarrollos tecnológicos empresariales a nivel mundial.

Cada buscador arrojó resultados diferentes de búsqueda y en el caso de Google ofreció resultados duplicados de un artículo, de acuerdo a su publicación en diversos portales, revistas o blogs, por lo que fue necesaria la siguiente etapa: proyección.

6.2 Proyección

Aquí se analizaron los títulos de los documentos que arrojó el buscador como resultado y se rechazaron las duplicidades, sobre todo en el caso de Google que no discrimina la información de diferentes plataformas y puede arrojar el mismo estudio varias veces, de acuerdo al número de veces que se haya publicado el documento en diversas páginas y revistas. Esta situación no se presenta en BiDi UNAM o Elsevier. Los títulos que coincidan con el tema de investigación se reservan para la siguiente etapa.

6.3 Elegibilidad

Como resultado de la primera búsqueda en inglés y español en las plataformas mencionadas, se obtuvo una amplia gama de artículos, por lo que, en esta etapa se discriminaron los documentos de acuerdo a los criterios de elegibilidad que se establecieron en el protocolo y que se enumeran a continuación:

Criterios de elegibilidad

1. Importancia sobre la salud: Dada la situación de la población mundial, la salud es un tema ineludible en los adelantos científicos y tecnológicos.
2. Publicaciones actuales: ofrecen los resultados de experimentaciones recientes, lo que significa que se han realizado corrección de inconvenientes presentados en experimentaciones de años anteriores e indica la tendencia en investigación.
3. Acceso a textos completos: es indispensable la oportunidad de leer el artículo con la parte experimental completa, si bien, el *abstract* ofrece información importante entre los objetivos y resultados de las investigaciones, dentro del cuerpo del artículo se encuentran los materiales y métodos empleados como criterios experimentales.
4. Documentos más referidos: Ofrecen confiabilidad de la información porque han superado varias revisiones por pares y por lectores especializados que continúan citándolo, reforzando con ello los hallazgos reportados.
5. Referencias para una segunda búsqueda: Permiten una profundidad en conocimiento y sortear las posibles omisiones en los motores de búsqueda.

Para realizar la elección de los documentos se leyó el título, se examinó de acuerdo a los criterios de elegibilidad, se leyó el resumen o *abstract* de los documentos que se aceptaron en la etapa anterior, se analizó si el resumen resuelve alguna de las preguntas de investigación. En caso afirmativo, se aceptó el documento y se procedió leer el texto completo, como preludeo de la siguiente etapa. Se rechazaron los documentos incompatibles con los criterios de elegibilidad.

6.4 Incluidos Cualitativos

En esta etapa se realizó el señalamiento de los datos a considerar contenidos en los artículos que responden las preguntas de investigación y que preparan el meta-análisis documental. Adicionalmente se revisaron las referencias de cada documento considerado en búsqueda de lograr un mayor alcance, y que subsanaran las omisiones de los criterios de selección efectuados con los motores de búsqueda.

6.5 Incluidos Meta-análisis

Son estudios que tienen la finalidad de compilar toda la información disponible, agruparla de acuerdo a un tema específico y evaluarla para analizar tendencias sobre el tema, responder nuevas preguntas, definir áreas en las que se necesita mayor investigación, entre otros. En general proporciona una interpretación general de los resultados con implicaciones para investigaciones futuras (Bolaños y Calderón, 2014). Después de haber efectuado una lectura a los documentos, y habiendo extraído información que contribuyera a responder las preguntas de investigación, se organizaron y agruparon de conformidad a la capacidad de responder las preguntas de investigación y se concentraron en una sola matriz de información.

En esta etapa se resumen los hallazgos principales y se colocan dentro de un cuadro de estudio que conformó la base de datos “Meta-análisis documental sobre la aplicación del efecto fotocatalítico de TiO₂ en la desinfección de agua”, y que recoge la información en los siguientes campos: a) Métodos de síntesis u Obtención del Fotocatalizador, b) Microorganismo de prueba en desinfección fotocatalítica, c) Parámetros de control, d) Comportamiento de la eliminación/inactivación y e) ventajas/Limitaciones de aplicar el efecto. Para integrar un documento al meta análisis, debe cubrir los siguientes criterios:

Criterios de Meta-análisis documental.

1. Documentos obtenidos por búsqueda de palabras clave: En el primer filtro, se observó que el título tenga relación con el tema a investigar.
2. Documentos que respondieran las preguntas de investigación: Se observó el *abstract* y se analizó que responde alguna de las preguntas de investigación, donde, en caso afirmativo se descargó, y en caso negativo no se consideró.
3. Documentos con método experimental detallado: Se requirió acceso al documento completo, y dentro del cuerpo del artículo debe se localizó la sección correspondiente a materiales y métodos (parte experimental), la cual debía contar con detalles suficientes que contribuyeran al estudio, tal como volúmenes empleados, caracterización de microorganismos, montaje del ensayo, foto-micrográficas, por mencionar algunas.
4. Documentos con análisis de resultados explícitos: Análisis detallado de los resultados experimentales con gráficas, eficiencias, cinéticas, cuadros comparativos, entre otros.
5. Documentos obtenidos por las referencias de los documentos incluidos para segunda búsqueda.

7. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Por medio del Meta-análisis documental empleado fue posible direccionar empleando los sistemas de información de los últimos diez años un total de 67 artículos relacionados con la aplicación del efecto fotocatalítico del TiO_2 en desinfección de agua. Dicha información, que buscó concentrar y presentar en una sola base de datos la información más importante encontrada en los reportes de desinfección fotocatalítica, para de esta manera, dar respuesta a las preguntas de investigación, facilitar su comparación y análisis, así como caracterizar la situación actual de la tecnología e identificar las áreas de oportunidad de desarrollo en cuestión de un método de síntesis u obtención del fotocatalizador, microorganismos de prueba en desinfección fotocatalítica, parámetros de control determinados, tal como: carga de fotocatalizador, carga Inicial de microorganismos, fuente de luz, intensidad de luz, matriz de agua y pH, eficiencia de inactivación (tiempo y reducción de poblaciones), constantes cinéticas. Si bien, el análisis se consideró para el intervalo de 2010-2020, también fueron considerados algunos artículos de 2021, ya que contribuyeron con información relevante dentro del presente trabajo, y que quedan resumidos pero seccionados por tema en la Tabla 7.1 del Anexo 1.

A partir de la Tabla 7.1, la presentación cronológica progresiva de los resultados obtenidos en la búsqueda en relación al año de publicación (2010-2021) permite dar un seguimiento a un orden de ideas gradual y sucesivo permitieron desprender los siguientes enunciados:

- a) Se encontró que la adquisición del TiO_2 con un proveedor es la forma más usada de obtención, mayormente en forma de Anatasa y en menor medida, rutilo. La técnica más empleada es el *slurry*, que consiste en colocar el fotocatalizador en polvo dentro del agua, con la desventaja de una complicada recuperación debido al diámetro de partícula. Este compuesto no debe ser liberado al ambiente, pues podría generar complicaciones ambientales.
- b) Dentro de los métodos de síntesis, el más empleado el método sol-gel a partir de precursores como el Tetraisopropóxido de titanio (TTIP), titanato de tetrabutyl (TTB) o butóxido de Titanio (IV), seguidos de métodos de modificación del tamaño de partícula del fotocatalizador como coprecipitación (Liu et al., 2012), fotodeposición (Jeong et al., 2021), deposición de vapor químico en aerosol, ACVD (Park et al., 2013) y la reducción fotoquímica (M.V. Liga et al., 2011), siendo los menos usados la formación de nanofibras (Cheng et al., 2019), nanotubos y nanobarras (Aminedi et al., 2013). Dichos métodos permiten incluir átomos de otros elementos conocidos como dopantes, que inyectan electrones al fotocatalizador haciéndolo más sensible a la energía luminosa, facilitan el aumento en la formación de ERO, reducen la recombinación de los excitones y por ende, se aumenta la velocidad de oxidación.

- c) Las experimentaciones demuestran que, gracias a los diferentes métodos de síntesis, es posible fijar el fotocatalizador a diversas superficies que permiten el paso del agua en flujo continuo y facilitan la recuperación y reúso el fotocatalizador. Los soportes encontrados más destacados son: mallas (De La Cruz & Murcia, 2018; Jeong et al., 2021), inmovilizado en silicón (Liu et al., 2021), fijo en vidrio (Camacho-Muñoz et al., 2020; Pleskova et al., 2016), cuarzo (Sun-Hyoung et al., 2017), acero (Yu et al., 2016), acetato de celulosa (Sreeja, y Vidya, 2016) o en tubos de colectores solares cilindro parabólicos - CPC (Monteagudo et al., 2017; Saran, Arunkumar y Devipriya, 2017).
- d) Se encontró que la aplicación del efecto fotocatalítico del TiO_2 en desinfección de agua es una técnica efectiva para inactivación o destrucción de: virus como los bacteriófagos de *E. coli* y el Norovirus murino MNV, bacterias Gram positivas como *Staphylococcus aureus* y *Bacillus cereus*, bacterias Gram negativas como *E. coli* y *Salmonella*, las cianobacterias *Microcystis aeruginosa* y *Cylindrospermopsis raciborskii*, las cianotoxinas Microcistinas y Cilindrospermopsina, esporas de clostridium reductores de sulfito (SRC), hongos como el *Aspergillus niger* y ooquistes de *Cryptosporidium parvum*. Sin embargo, aun los organismos de prueba se encuentran limitados en cada grupo, por lo cual existe.
- e) Las eficiencias de remoción reportadas alcanzan entre un 90%, reportando la remoción total de organismos, llegando a inactivar poblaciones de hasta 7.5 log. (Escuadra, et al., 2015; Tzeng et al., 2021). De acuerdo a lo reportado en los artículos de investigación, la bacteria más empleada como sujeto de prueba es *E. coli*, el segundo sujeto de prueba son los virus bacteriófagos y en tercer lugar las enterobacterias. La mayoría de los ensayos se realizó en presencia de más de un tipo de microorganismo.
- f) Se encontró que, los parámetros de control empleados en los ensayos de desinfección fotocatalítica con TiO_2 en orden de importancia de acuerdo a los resultados encontrados son: Carga del fotocatalizador, concentración inicial del microorganismo, fuente de luz, intensidad de luz, matriz de agua y pH. La carga del fotocatalizador al igual que la carga inicial de los microorganismos definen la velocidad de reacción, esto podría deberse a que la concentración de microorganismos en el agua aumenta la turbiedad y dificulta el paso de la luz, que es el origen del efecto fotocatalítico de desinfección y de la generación de las ERO requeridas.
- g) Se encontró que existe una tendencia de incremento respecto al uso de energías limpias y renovables como fuente de irradiación, así como el uso de lámparas de mercurio de baja o alta presión que ha comenzado a caer en desuso. Como consecuencia, el uso de luz LED se perfila como una nueva herramienta de

irradiación en los ensayos de desinfección fotocatalítica (Liu et al., 2021; Pestana et al., 2015; Xiong & Hu, 2013).

- h) La fuente e intensidad de luz se presenta generalmente en mW/cm^2 , sin embargo, de acuerdo a lo reportado se presenta también en W , $\mu\text{W}/\text{cm}^2$, W/m^2 , Einstein/sL, y se especifican en cada caso.
- i) Las matrices de agua comprenden diferentes orígenes, desde el agua ultrapura y desionizada del laboratorio hasta aguas superficiales (Lydakís-Simantitris et al., 2010; Murcia et al., 2017), subterráneas (Lee y Ko, 2013), efluentes de PTARM (Ángel, 2018; Rodríguez, 2016) y efluentes farmacéuticos (Mahmoudian-Boroujerd et al., 2018), por citar algunos.
- j) Las modificaciones al fotocatalizador por medio del dopaje o al tipo de fotorreactor empleado posicionan a la luz solar como una técnica prometedora en la desinfección de aguas.
- k) A pesar de que el pH es un factor importante para la actividad del fotocatalizador y la adsorción de los microorganismos sobre su superficie debido al punto isoeléctrico del TiO_2 (potencial Z), no todos los artículos proveen este dato.
- l) Los tiempos de residencia en el reactor se expresan en minutos (θ), hasta lograr el mayor porcentaje de eliminación/inactivación de microorganismos de la que se pueda medir su eficiencia de inactivación (η) tanto en porcentaje (%) como en unidades logarítmicas removidas/inactivadas (log).
- m) Los reportes de las cinéticas resultan escasos y precarios, ya que de manera general solo se incluye ocasionalmente la evaluación cinética y el ajuste a un modelo de desinfección establecido junto a sus constantes cinéticas (k), dejando así el resto de los parámetros que pudieran brindar información acerca de la forma en la cual ocurre el fenómeno de desinfección, así como de modelos a los cuales se pudiera sujetar la desinfección o inactivación particular del organismo.

7.1 Síntesis/ Obtención del TiO_2

El dióxido de titanio se emplea generalmente en *slurry*, de hecho, sólo algunos artículos refieren algún método de recuperación, tal como el empleado por Mangayam et al., (2017), quienes sintetizaron nanotubos magnéticos de TiO_2 -Ag3%-FeOx3% anatasa con un área de superficie de $50 \text{ m}^2/\text{g}$, con un diámetro de aproximado de 8 nm, una longitud 100 nm aproximadamente y se recuperaron magnéticamente mediante un imán externo para su posterior reutilización. La modificación del tamaño de partícula facilita la recuperación del fotocatalizador y le permite el desplazamiento dentro del seno del líquido que favorece el contacto de los excitones en la superficie del TiO_2 con los microorganismos, por lo que, la formación de estructuras como las nanofibras (Cheng et al., 2019, Zheng et al., 2018) los nanotubos y las nanobarras (Aminedi et al., 2013) también es explorada. Otro de los métodos

de síntesis más empleado y que facilitan el dopaje es el método sol gel, la coprecipitación (Liu et al., 2012), fotodeposición (Jeong et al., 2021), deposición de vapor químico en aerosol, ACVD (Park et al., 2013) y la reducción fotoquímica (M.V. Liga et al., 2011). Estos métodos permiten fijar el fotocatalizador a diversas superficies. El TiO₂ fijo, ofrece grandes ventajas al permitir el empleo de reactores de flujo continuo facilitando la recuperación del fotocatalizador y su reuso, en el punto 6.4 se detalla la información.

En 28 artículos se ha ocupado, al menos, una forma de dopaje para el TiO₂ con, al menos, un tipo de elemento de los grupos 6 a la 16 de la tabla periódica. En la Tabla 7.2 se muestran los elementos más ocupados para dopaje y sus estados de oxidación, de acuerdo a los materiales reportados en los artículos.

Tabla 7.2 Elementos comúnmente usados en dopaje de TiO₂ para desinfección fotocatalítica

(Elaboración propia)

Grupo	Elemento	Estados de oxidación		
6	Cr	+3		
7	Mn	+2		
8	Fe, Ru	+2, +3		+2
9	Co	+2		
10	Ni, Pd, Pt	+2	+2	+4
11	Cu, Ag, Au	+2	+1	+3
12	Zn	+2		
13	Al	+3		
14	C	+4		
15	N y P	+3 y +5		+4
16	S	+6		
Lantánidos	Ce	+3		

Es posible identificar que los elementos empleados para dopaje se presentan en su forma catiónica, lo cual genera una afinidad electrostática con las bacterias Gram negativas facilitando su adsorción en la superficie del fotocatalizador y aumentando la eficiencia de inactivación (Juhua et al., 2021). El elemento más frecuente para dopar al fotocatalizador en ensayos de desinfección es la plata (Ag), ya que sus propiedades bactericidas la convierten en un excelente desinfectante, incluso en ausencia de luz incrementa la eficiencia del TiO₂ del 20% al 90% (Mahmoudian-Boroujerd et al., 2018; Rodríguez, 2016; Sreeja y Vidya, 2016; Kowalska et al., 2015; Xiong et al., 2011; Suri, Thornton & Muruganandham, 2012; Kowal et al., 2011), e incluso superior al 99% (Liu et al., 2021; Mangayayam et al., 2017; Liu et al., 2012;) llegando a niveles no detectables de microorganismos y cuya única limitante es la concentración inicial del microorganismo en concentraciones superiores a 4E09 UFC (Sreeja y Vidya, 2016), con tiempos de residencia que van desde 1.9 min en agua ultra pura

(Liga et al., 2011), hasta 720 min de irradiación en agua residual farmacéutica (Mahmoudian-Boroujerd et al., 2018) para la degradación de ADN recombinante en la fabricación de vacuna para Hepatitis B obtenida por modificación genética de la levadura *Pichia Pastoris*

El segundo elemento más ocupado en dopaje, es el Nitrógeno. Su tiempo mínimo de irradiación UV-Vis es de 120 min con *E.coli*, logrando inactivar 1.6 log de una concentración inicial de 2.2 log (Ashkarran et al., 2014), mientras que con *Klebsiella pneumoniae* le tomó 900 min de irradiación para eliminar la totalidad partiendo de una concentración inicial de $1E05$ UFC y 750 min cuando se agregó Turmalina (Huang et al., 2020). En el caso de la cianotoxina Microcistina LR, generada por las cianobacterias *Microcystis* sp, tomó un total de 120 minutos de irradiación y 400 mg/L de TiO_2 -C-N para eliminar al 100% una concentración de 10 mg/L (Khedr et al., 2019), una concentración mayor a la contemplada en el nivel de alerta 1 que proporcionada por la OMS y la USEPA.

Generalmente, las bacterias están cargadas negativamente en la superficie de su membrana lo que sugiere que su comportamiento se verá influenciado por las cargas electrostáticas presentes a su alrededor (Rizzo et al., 2014). Si la superficie del fotocatalizador se encuentra con carga positiva, fomenta una mayor interacción electrostática entre el fotocatalizador y las bacterias. La mejora de la atracción electrostática da como resultado una distancia de difusión más corta, lo que aumenta la efectividad del ataque de las ERO fotogeneradas a dichos microorganismos. Por esta razón, los cationes covalentes como el Cu^{+2} en la solución pueden unir las bacterias con el TiO_2 . El dopaje con metales de transición como la plata (Sreeja y Vidya, 2016) mejora la absorción de luz visible, y la captura de electrones reduce la recombinación de los excitones al mejorar la separación entre los portadores de carga (e-/h+). De acuerdo a los modelos experimentales se observa que, para mejorar la interacción entre las bacterias y el fotocatalizador se requiere utilizar el dopaje del TiO_2 con elementos de carga positiva o mejorar mecánicamente el contacto del fluido con el fotocatalizador aprovechando la forma del sustrato donde sea soportado el dióxido de titanio (Yu et al., 2016; Maldonado, Suárez y Miranda, 2015).

7.2 Microorganismos empleados en ensayos de desinfección fotocatalítica

Aminedi et al. (2013), establece que la desinfección fotocatalítica daña las envolturas de las células bacterianas y el material genético en su interior, volviéndolas inviables para su reproducción, generando su muerte o su mineralización completa, de acuerdo al tiempo de exposición. La Figura 7.1 nos muestra una Imagen de microscopía electrónica de transmisión (TEM), donde se aprecia la morfología de la superficie de células *A. tumefaciens* en varias etapas de tratamiento con 1 mg de TiO_2 en una película delgada, en un tiempo de exposición de 30 min de irradiación UV. La imagen del inciso a) muestra al organismo control, con forma y características definidas, mientras que la correspondiente al inciso b) se observa la membrana celular con una morfología distinta que evidencia el daño de la superficie de la célula bacteriana (se muestra con una flecha). Por su parte, las imágenes c) y d) muestran la

célula bacteriana con un volumen incrementado, que sugiere ser una consecuencia de un daño osmoregulatorio promovido por una fotorreacción prolongada.

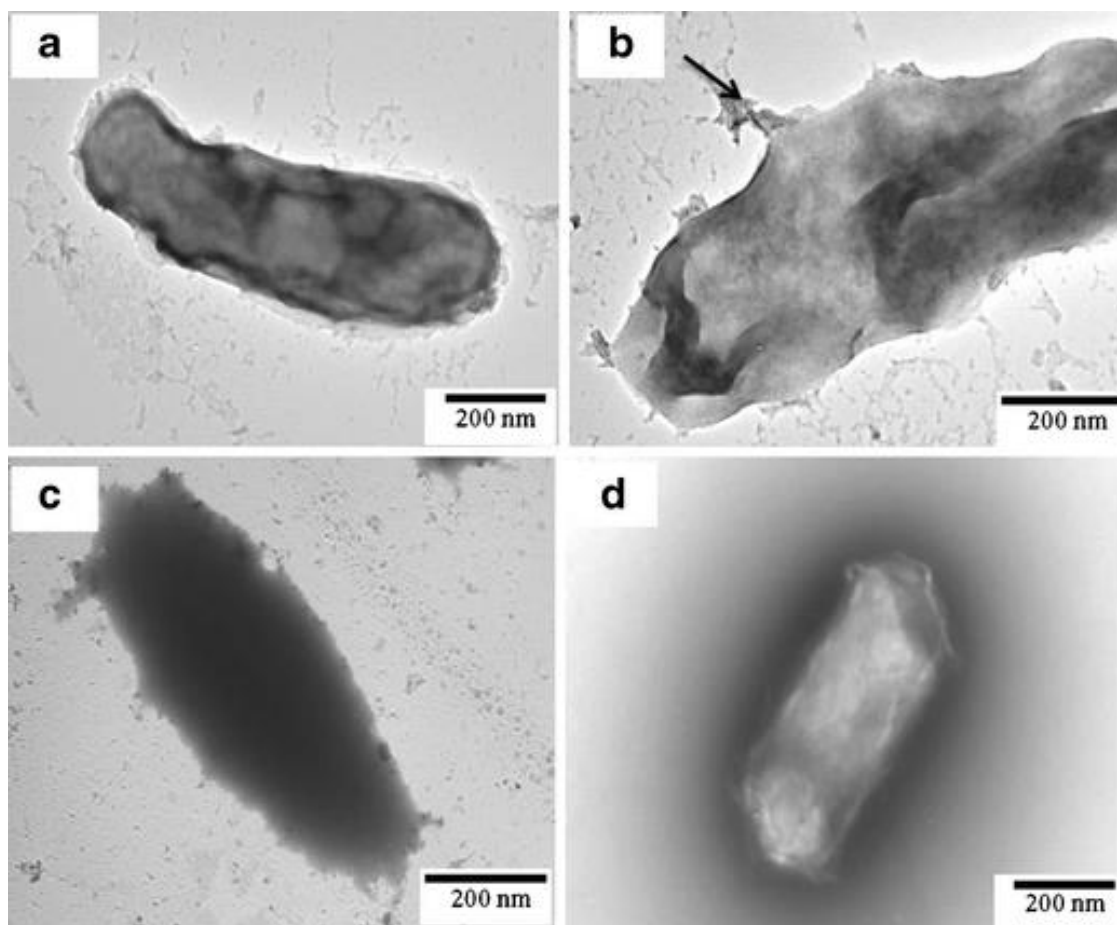


Figura 7.1 Imagen TEM que muestra la morfología de la superficie de células A. tumefaciens en varias etapas de tratamiento con 1 mg de TiO₂ en una película delgada durante 30 min de irradiación UV (Aminedi et al., 2013).

Cuando las membranas de las bacterias se dañan, las bacterias se inactivan o se vuelven incultivables, pero los desechos bacterianos pueden permanecer en la solución y adherirse al fotocatalizador (Kim et al., 2013), causando interferencias y evitando que las ERO generadas ataquen a otras bacterias que aún no han sido inactivadas. En casos donde la concentración inicial de microorganismos es mayor a 5 log. se produce un aumento en la turbiedad del agua después de iniciado el proceso fotocatalítico debido a que el material genético de la célula es expulsado por el rompimiento de la cápside, la desinfección se torna lenta formando “colas” en las gráficas (Sreeja y Vidya, 2016) y las ERO, que no son selectivas, interactúan con los restos del microorganismo. Esta es la principal diferencia con la mineralización fotocatalítica de contaminantes orgánicos, donde esos contaminantes se transforman en CO₂ y H₂O, sin provocar nuevas interferencias.

La Figura 7.2 muestra una microfotografía electrónica de barrido de las bacterias *E. coli*, *L. monocytogenes* y *S. typhimurium* tratadas en una reacción de oxidación fotocatalítica con TiO_2 asistida por UV donde de acuerdo a Kim et al., (2013) se observa el impacto de la radiación UV- TiO_2 sobre los organismos antes mencionados a diferentes tiempos de exposición. En ellos, el autor señala que ellos pierden progresivamente la definición hasta llegar a la lisis total, vertiendo su contenido al medio.

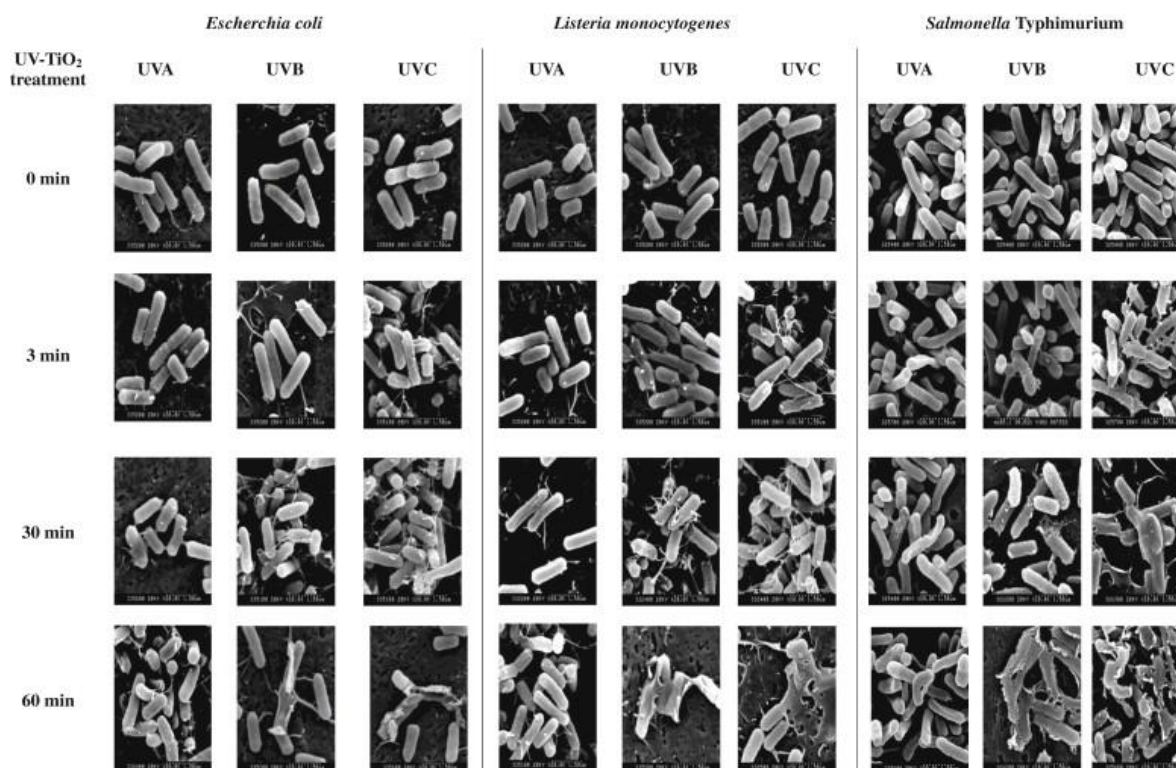


Figura 7.2 Microfotografía electrónica de barrido de *E. coli*, *L. monocytogenes* y *Salmonella typhimurium* tratadas en una reacción de oxidación fotocatalítica con TiO_2 asistida por UV (Kim et al., 2013).

Es importante señalar que la materia orgánica disuelta provee refugio a las bacterias, y por lo general se carga negativamente en medios acuosos, incluso con un valor de $\text{pH} = 4$. Lo anterior ocasiona que se adsorba fácilmente sobre la superficie de TiO_2 con carga parcial positiva originando un aumento de las fuerzas repulsivas entre las bacterias cargadas negativamente y el TiO_2 , inhibiendo el contacto directo entre las células bacterianas y los fotocatalizadores e induciendo la competencia por especies reactivas. Tanto su afinidad por el fotocatalizador, como su tamaño molecular hacen que la materia orgánica sea competitiva frente a las bacterias y, por tanto, fomentan el consumo de especies reactivas que se generan principalmente en la superficie del fotocatalizador. Además, la materia orgánica dispersa puede absorber la luz incidente y actuar como un escudo contra la luz, especialmente la luz ultravioleta. La presencia de biopelículas afecta positivamente la adherencia de los oocistos de *Cryptosporidium* a las diferentes partículas ya que no son fácilmente destruidas o

penetradas por los desinfectantes y permiten el transporte de una concentración más alta de oocistos, además protegen la integridad y permeabilidad de la pared del protozooario durante la exposición a rayos UV (Téllez, 2012).

La Figura 7.3 muestra la imagen de microscopio electrónico de barrido (SEM) de un oocisto de *Cryptosporidium parvum* después de un tratamiento de desinfección fotocatalítica. En ella se puede observar una clara deformación de la capa externa del organismo e inclusive una ligera disminución de tamaño, lo cual puede indicar un impacto al interior derivado de una alteración osmoregulatoria del organismo.

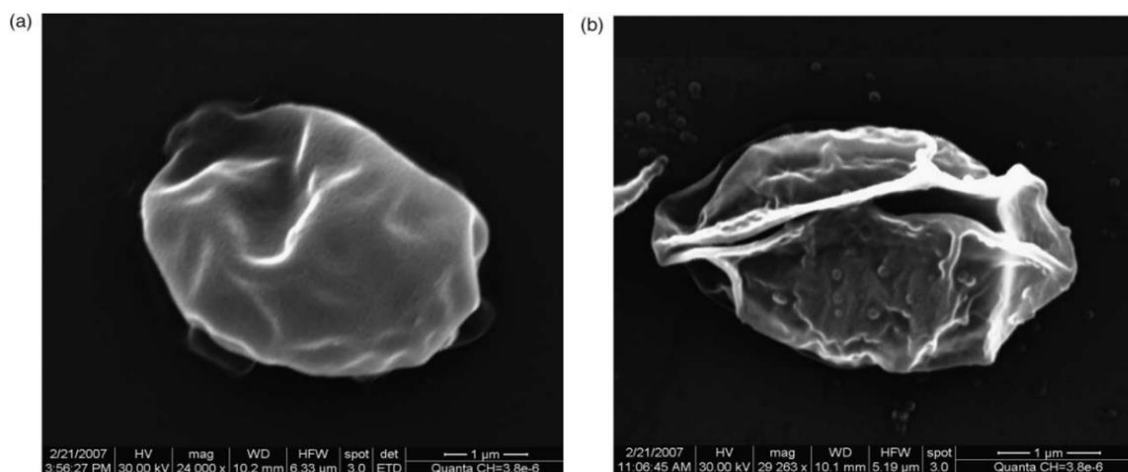


Figura 7.3 Imagen SEM de ooquiste de *Cryptosporidium parvum* (a) sin tratamiento y (b) cáscara vacía del ooquistos después del tratamiento fotocatalítico (Sunnotel et al., 2010).

La Tabla 7.3 recopila a los microorganismos empleados en ensayos de desinfección fotocatalítica hallados en esta investigación. Ellos se ordenaron de acuerdo al número de publicaciones encontradas comenzando por los microorganismos citados con mayor frecuencia, su clasificación y la repercusión que tienen sobre la salud humana. Es posible identificar a *E. coli* como el organismo más empleado, seguido de sus bacteriófagos, algunas otras enterobacterias y virus de la misma procedencia. Es importante señalar que, otros grupos de interés sanitario tal como cianotoxinas o *Pseudomonas*, también son considerados, pero en menor proporción. Restan otros microorganismos, tales como: protozoarios y helmintos, los cuales no han sido explorados por los autores en la presente década. En el caso de hongos, se presenta el estudio de tres especies: *Aspergillus niger*, *Candida albicans* y *Fusarium equiseti* con un solo artículo por especie. Ello resulta en la limitación de información para otros momentos del presente trabajo.

Tabla 7.3 Microorganismos empleados en ensayos de desinfección fotocatalítica

(Con información de Graham, 2020; OMS, 2020; Khedr et al., 2019; Calicó, 2018; Lerma y Farga, 2018; Murray, 2018; Gallo, 2017; Ríos-Tobón et al., 2017; Kuri-Morales, 2015; USEPA, 2015; Lee y Ko 2013; Wilhelmi et al., 2001; Whitman, 1998.)

Microorganismo	No. De Artículos	Clasificación	Repercusión en la salud humana
<i>Escherichia coli</i> , <i>E. coli</i> resistente a antibióticos	38	Bacteria Gram-negativa	La resistencia a los antibióticos o genes recombinantes puede propagarse por transferencia horizontal de genes (HGT) y producir rasgos nuevos o alterados. Aumento la incidencia en cepas resistentes a los antibióticos.
Bacteriófagos de <i>E. coli</i> : FRNA, SOMCPH, MS2, F2, ΦX174, PR772.	10	Virus	Los bacteriófagos son virus que infectan a bacterias. Pueden interrumpir el metabolismo bacteriano, proliferar dentro de ellas y ocasionar lisis de las células. Son los agentes biológicos más abundantes en el planeta. Tienen la capacidad de convertir cepas de bacterias inofensivas en formas altamente virulentas
Enterobacterias: Coliformes Fecales, Coliformes totales, Coliformes termotolerantes	8	Bacteria Gram-negativa	Se utilizan como indicador de bacterias, virus o protozoos y parásitos en los alimentos o el agua. Son fáciles de cultivar. Forman parte de la microbiota del intestino y de otros órganos del ser humano o especies animales
<i>Staphylococcus aureus</i> , <i>Staphylococcus aureus</i> 455, <i>Staphylococcus aureus</i> 956, <i>Staphylococcus epidermidis</i>	8	Bacteria Gram-positiva	Produce infecciones cutáneas y de las mucosas como foliculitis, forunculosis o conjuntivitis o enfermedades de riesgo vital, como osteomielitis, meningitis, sepsis, endocarditis o neumonía. Puede afectar al aparato gastrointestinal, por la ingesta de la enterotoxina estafilocócica secretada por la bacteria.
Cianotoxinas: Cilindropermopsina, Microcistinas, Nodularin	5	Toxinas	Existen cianobacterias que producen tóxicos potentes que dañan órganos y afectan la función de varios sistemas biológicos. Han provocado muertes en humanos y animales.
<i>Enterococcus faecalis</i> , <i>Enterococcus faecium</i> <i>Enterococcus</i> sp	5	Bacteria Gram-positiva	Causan importantes infecciones clínicas, incluyendo infección urinaria, bacteriemia, endocarditis, diverticulitis y meningitis.

Tabla 7.3 Microorganismos empleados en ensayos de desinfección fotocatalítica

(Con información de Graham, 2020; OMS, 2020; Khedr et al., 2019; Calicó, 2018; Lerma y Farga, 2018; Murray, 2018; Gallo, 2017; Ríos-Tobón et al., 2017; Kuri-Morales, 2015; USEPA, 2015; Lee y Ko 2013; Wilhelmi et al., 2001; Whitman, 1998.)

Microorganismo	No. De Artículos	Clasificación	Repercusión en la salud humana
<i>Pseudomona aeruginosa</i> <i>Pseudomona fluorescens</i>	5	Bacteria Gram-negativa	Las infecciones pueden afectar a muchas partes del cuerpo, en particular las vías respiratorias. El tratamiento puede ser difícil debido a la resistencia antibiótica.
<i>Klebsiella oxytoca</i> , <i>Klebsiella pneumoniae</i>	4	Bacteria Gram-negativa	Provoca síntomas graves: Sepsis potencialmente mortal. Infecciones respiratorias como neumonía.
<i>Salmonella abony</i> , <i>Salmonella typhimurium</i> sp	4	Bacteria Gram-negativa	Generalmente vive en los intestinos de animales y humanos y se libera mediante las heces. La salmonelosis es una enfermedad bacteriana frecuente que afecta el aparato intestinal.
<i>Listeria monocytogenes</i>	3	Bacteria Gram-positiva	La listeriosis es una infección grave causada por el consumo de alimentos contaminados con esta bacteria. Alrededor de 1600 personas contraen la listeriosis cada año y ~260 mueren por la enfermedad.
<i>Bacillus cereus</i> <i>Bacillus subtilis</i>	2	Bacteria Gram-positiva	Compite con microorganismos como <i>Salmonella</i> y <i>Campylobacter</i> , en el tracto gastrointestinal, por lo que su presencia reduce el número de esos microorganismos. Produce dos tipos de toxiinfecciones alimentarias: la forma diarreica y la forma emética.
Cianobacterias: <i>Microcystis aeruginosa</i> <i>Cylindrospermopsis raciborskii</i>	2	Bacteria Gram-negativa	Son organismos fotosintéticos que producen metabolitos con propiedades antiinflamatoria, antiviral y anticancerígena. También producen cianotoxinas.
<i>Clostridium perfringens</i> Esporas reductoras de sulfito (SRC)	2	Bacteria Gram-positiva	Causa desde intoxicación alimentaria hasta gangrena gaseosa. Es también causante de una enterotoxemia, frecuentemente hemorrágica en carneros, novillos, ovejas y cabras.

Tabla 7.3 Microorganismos empleados en ensayos de desinfección fotocatalítica

(Con información de Graham, 2020; OMS, 2020; Khedr et al., 2019; Calicó, 2018; Lerma y Farga, 2018; Murray, 2018; Gallo, 2017; Ríos-Tobón et al., 2017; Kuri-Morales, 2015; USEPA, 2015; Lee y Ko 2013; Wilhelmi et al., 2001; Whitman, 1998.)

Microorganismo	No. De Artículos	Clasificación	Repercusión en la salud humana
<i>Cryptosporidium parvum</i> , Ooquistes	2	Protozoo	Causa brotes de diarrea en reservorios de agua contaminados. En pacientes inmunocomprometidos, puede causar diarrea severa, colecistitis y pancreatitis.
Norovirus murino MNV	2	Virus	El norovirus humano (HuNoV) es una de las principales causas de enfermedades transmitidas por los alimentos asociadas con el consumo de mariscos. En ensayos de desinfección se utiliza el norovirus murino (MNV-1) como sustituto de HuNoV.
<i>Agrobacterium tumefaciens</i>	1	Bacteria Gram-negativa	Es una bacteria que causa en las plantas dicotiledóneas unos tumores conocidos como "corona de agallas" o "tumores del cuello", que crecen en la zona donde se unen la raíz y el tallo.
<i>Aspergillus niger</i>	1	Hongo	Es un hongo que produce un moho negro en vegetales, muy común en la lechuga, el tomate o la acelga y limón.
<i>Candida albicans</i>	1	Hongo	Provoca candidiasis como una afección vaginal (vaginitis), o aftas en la boca, intestino o la piel. Se ha investigado una posible relación entre la candidiasis y el cáncer, mediante la producción de micotoxinas o compuestos cancerígenos o mediante inflamación crónica y procesos que interfieren con el ciclo vital de las células.
Esporas de <i>Fusarium equiseti</i> : clamidosporas (M3T1b), macroconidios (M2T1b), microconidios (FS12)	1	Hongo	Están ampliamente distribuidos en suelo y el agua en todo el mundo, incluso en los hospitales. Los fungicidas químicos tradicionales, como el etridiazol, se vuelven fitotóxicos y a menudo ineficaces.

Tabla 7.3 Microorganismos empleados en ensayos de desinfección fotocatalítica

(Con información de Graham, 2020; OMS, 2020; Khedr et al., 2019; Calicó, 2018; Lerma y Farga, 2018; Murray, 2018; Gallo, 2017; Ríos-Tobón et al., 2017; Kuri-Morales, 2015; USEPA, 2015; Lee y Ko 2013; Wilhelmi et al., 2001; Whitman, 1998.)

Microorganismo	No. De Artículos	Clasificación	Repercusión en la salud humana
<i>Legionella thermalis</i>	1	Bacteria Gram-negativa	Puede crecer y multiplicarse en sistemas de agua de edificios, transmitiéndose a las personas a través de diminutas gotas de agua en el aire. Provoca la enfermedad del legionario (un tipo de neumonía grave) y en la actualidad no hay vacunas para prevenirla.
<i>Micrococcus caseolyticus</i>	1	Bacteria Gram-positiva	Es un coco gram-positivo, no forma esporas y se aisló de carne animal. A diferencia de las especies de estafilococos, no causa enfermedades en humanos o animales
<i>Micrococcus spp</i>	1	Bacteria Gram-positiva	Se consideran inofensivos, habitan o contaminan la piel, las mucosas y la orofaringe. Se asocia con infecciones, como bacteriemia y peritonitis. Se han aislado de muestras de sangre en pacientes con enfermedades coronarias e infecciosas..
<i>Mycobacterium avium</i>	1	Bacteria Gram-positiva	Es un grupo de bacterias relacionadas genéticamente. Son comunes en el medio ambiente y causan infecciones cuando se inhalan o ingieren. Los síntomas de la enfermedad son similares a los de la tuberculosis. Incluyen fiebre, fatiga y pérdida del peso. Muchos pacientes tendrán anemia y neutropenia si la médula se ve afectada.
<i>Proteus vulgaris</i>	1	Bacteria Gram-negativa	Habita en el tracto intestinal de varios animales. Puede ser aislado de la tierra, agua y materia fecal. Causa infecciones urinarias, en heridas y en abscesos hepáticos.
Virus Hepatitis B, ADN	1	Virus	La enfermedad se transmite por la exposición a los fluidos corporales infectados. Los síntomas pueden incluir color amarillento de los ojos, dolor abdominal, orina oscura, insuficiencia hepática, cáncer o cicatrices.

7.3 Condiciones operativas de la desinfección fotocatalítica del agua

La configuración del fotorreactor es uno de los pasos más importantes en la experimentación con fotocatalizadores, ya que se debe garantizar la irradiación de toda la superficie del fotocatalizador con la luz adecuada para dar inicio y mantener la generación de especies oxidantes, mientras que, el agua y el microorganismo de estudio deben permanecer el tiempo suficiente cerca de la superficie del fotocatalizador para lograr la mayor tasa de inactivación. El menor tiempo de inactivación, fue para el ensayo con Fago MS2 eliminando 4 log de población con 0.75 minutos y 100 mg/L de TiO₂-Ag 5,95% (Liga et al., 2011). El mayor tiempo fue para oxidar al Fago PR772, se requirieron hasta 1300 minutos de irradiación (Misstear y Gill, 2012) y 900 minutos para inactivar 1E05 UFC de *Klebsiella pneumoniae* con 1.2 g/L de TiO₂-N (Huang et al., 2020).

Por otra parte, la iluminación es indispensable en la configuración del fotorreactor y el emplear el fotocatalizador fijo a una superficie puede crear puntos muertos de luz (“sombras”) en ciertas áreas que disminuyan el efecto esperado, por lo que generalmente se elige vidrio o cuarzo como soporte (Maldonado, Suárez y Miranda., 2015). El uso de esferas favorece la desinfección, quizá por efecto óptico de distribución homogénea de la luz en toda su superficie y además, permite una extracción fácil del líquido (Pestana et al., 2015). El uso de colectores cilindro-parabólico (CPC) facilita el flujo del agua y permite usar energía solar como fuerza impulsora de la desinfección fotocatalítica. El TiO₂ puede fijarse en la parte interior de los tubos del colector u ocupar un tubo interior concéntrico que contenga el fotocatalizador en su pared exterior, esta conformación tuvo una eficiencia alta (Alrousan et al, 2012). Se han realizado ensayos con UVA, UVB, UVC, UV-Vis y luz LED tanto blanca como UV con excelentes resultados, por lo que el uso de lámparas con vapor de mercurio está cayendo en desuso (Buck et al., 2018; Pestana et al, 2015; Kim et al, 2013; Lanao et al, 2012).

Fijar el fotocatalizador a un soporte interno permite incrementar el flujo del agua, en la mayoría de los casos se ocupa la recirculación para aumentar el mezclado mecánico y favorecer las probabilidades de contacto microorganismo-fotocatalizador cuando no existe afinidad electrostática entre ellos.

Los parámetros operacionales que frecuentemente se controlan en los ensayos de desinfección fotocatalítica se muestran en la Tabla 7.4 se realiza una descripción de cada uno y las interacciones que favorecen o dificultan la desinfección fotocatalítica

Tabla 7.4 Parámetros operacionales a controlar en desinfección fotocatalítica con TiO₂ (Elaboración propia)

Factor	Efecto
Fotocatalizador	Material El dopaje del TiO ₂ con elementos cargados positivamente tienen mayor eficiencia de inactivación en menor tiempo. La calcinación cambia la estructura cristalina y mejora la eficiencia (Kowal et al, 2011).
	Soporte Con mayor frecuencia se ocupa el método de <i>slurry</i> para integrar el fotocatalizador al líquido, sin embargo, el TiO ₂ fotodepositado en malla (Jeong et al., 2021), inmovilizado en silicón (Liu et al., 2021), fijo en vidrio (Park et al., 2013; Alrousan et al, 2012), cuarzo (Sun-Hyoung et al, 2017), acero (Yu et al, 2016), acetato de celulosa (Sreeja y Vidya, 2016) o en tubos de CPC también tienen excelentes tasas de inactivación (Monteagudo et al, 2017; Saran, Arunkumar y Devipriya, 2017). El soporte del fotocatalizador debe permanecer inalterado en el medio y sin obstaculizar el paso de la luz.
	Carga Los mejores resultados se obtienen cuando la carga es de 1 g/L de fotocatalizador (Rodríguez-Chueca et al., 2016), en dosis más altas y en <i>slurry</i> genera interferencias con la iluminación al aumentar la turbidez (Wang et al., 2017).
Microorganismo	Forma Se encontró que, los nanotubos de TiO ₂ , a pesar de contar con mayor área superficial fueron superados por las nanofibras y las nanobarras (Aminedi et al, 2013)
	Tipo Todos los microorganismos estudiados presentan susceptibilidad a ser inactivados por la fotocatálisis con TiO ₂ aún en mezclas. El ADN _r del virus de Hepatitis (Mahmoudian-Boroujerd et al., 2019), los ooquistos de <i>C. parvum</i> (Abeledo-Lameiro Ares-Mazás & Gómez-Couso, 2016; Sunnotel et al, 2010), las bacterias Gram positivas (Gosgot, 2018; Lanao et al., 2010) y las cianotoxinas (Wang et al., 2017) son las especies que llevaron más tiempo para su inactivación/degradación.
	Concentración inicial La concentración inicial de microorganismo puede ralentizar la fotodesinfección debido a la turbiedad generada y formar un “hombro” al inicio de la gráfica y en instante que el material genético es expulsado por la rotura de la membrana. Esta cantidad de materia orgánica adicional interfiere con la irradiación de luz sobre la superficie y modifica paulatinamente el pH del medio (Rodríguez-Chueca et al., 2016).
Luz	Fuente de luz La intensidad energética de la irradiación es un factor que influye sobre la generación de ERO. Se realizaron ensayos con UVA, UVB, UVC, UV-Vis y luz LED blanca y UV con excelentes resultados.
	Luz solar CPC Los ensayos en CPC se han popularizado, permiten un mayores volúmenes de agua a tratar con tasas de desinfección bastante aceptables (Monteagudo et al, 2017; Saran , Arunkumar y Devipriya, 2017).

Tabla 7.4 Parámetros operacionales a controlar en desinfección fotocatalítica con TiO₂ (Elaboración propia)

Factor	Efecto
Matriz de agua	La presencia de materia orgánica, carbonatos y otros iones disueltos compiten por las especies reactivas de oxígeno, además de que la turbidez impide el paso de la energía irradiada por la luz. Aun así, se han llevado a cabo con éxito diversos ensayos con agua real de efluentes secundarios de PTAR, agua superficial, agua de lluvia, agua de grifo o agua con ácido húmico. Para mantener viables a los microorganismos, la mayoría de los ensayos se realizó en agua salina. En este tipo de ensayos, la adición de H ₂ O ₂ disminuyó la eficiencia (Ungría, 2016).
Turbidez	Es un factor crucial, para permitir la irradiación de la luz (Abeledo-Lameiro Ares-Mazás & Gómez-Couso, 2016)
Medio pH	Algunas bacterias crecen a pH bajos (3.0) y los hongos también se desarrollan a pH bajos (1.0). El rango óptimo de pH para las bacterias va de 6.0 hasta 8.5 y sólo pocas prefieren pH > 8.5. También es un factor importante para el potencial Z y la carga electrostática de la superficie del fotocatalizador. Varios artículos reportaron que este factor varía durante la desinfección fotocatalítica (generalmente disminuye), debido al aumento de materia orgánica cuando el material genético es expulsado por la ruptura de la membrana celular (Valades, 2021).
Mezclado	Garantiza el contacto entre el microorganismo de estudio y el fotocatalizador, en algunos ensayos se emplea agitación magnética, el burbujeo de oxígeno o aire como sistema de mezclado. Yu et al., (2016) presenta el fotocatalizador fijo en una estructura helicoidal de acero que también hace la función de mezclador de un flujo continuo.
Flujo	Dado que el fotocatalizador genera EROS constantemente y también se regenera, es posible emplearlo en un flujo continuo que va desde 2 L/min (Alrousan et al., 2012), hasta 15 gal/min (A. De La Cruz & D. Murcia, 2018).
Tiempo	El tiempo de residencia en el reactor depende de la concentración inicial de microorganismo (Sun-Hyoung et al., 2017; Ungría, 2016; Sreeja y Vidya, 2016).

De la tabla anterior, los parámetros críticos para el desarrollo de la desinfección fotocatalítica son: carga de fotocatalizador, concentración inicial del microorganismo, fuente lumínica y turbiedad inicial debida al origen del agua.

7.4 Carga del fotocatalizador

Se encontró que la mejor concentración para la carga inicial del fotocatalizador se encuentra entre 0.5 y 1 g/L Una de las principales disyuntivas, es la forma de emplear el fotocatalizador ya que si se emplea en *slurry* se requiere un paso extra para la recuperación

del fotocatalizador y si se emplea fijo en una superficie, la eficiencia disminuye debido al contacto limitado de la superficie del fotocatalizador con el seno del líquido y los microorganismos presentes. Otro factor importante es la interacción bacteria- fotocatalizador o afinidad, pues si electrostáticamente no hay atracción mutua, el proceso de desinfección se tornará más lento. La Tabla 7.5 muestra una síntesis de ellos

Tabla 7.5 Soporte para fijación del fotocatalizador TiO₂

(Elaboración propia)

Soporte	Microorganismo	Inactivación	Volumen	Referencia
Malla de acero	Escherichia coli, Legionella thermalis y Fago MS2	5 log	40 mL	Jeong et al., 2021
Sistema P/Ag/ Ag ₂ O/ Ag ₃ PO ₄ / TiO ₂ fijo en silicón	Enterococcus Sp, Staphylococcus aureus, Escherichia coli y Salmonella	1E05 UFC	50 mL	Liu et al., 2021
TiO ₂ -F-Ce en Perlita expandida	Microcystis aeruginosa	2E06 UFC	1 L	Wang et al., 2017
TiO ₂ -Ag fijo en acetato de celulosa	<i>E. coli</i>	4E09 UFC	250 mL	Sreeja y Vidya, 2016
TiO ₂ Photospheres	Microcistinas	10 µg /mL	3 mL	Pestana et al., 2015
TiO ₂ Hombikat K01 en Lecho empacado de flujo continuo	Microcistinas	30 µg/ L	3 L	Pestana et al., 2020
TiO ₂ fijo en paredes de tubos de vidrio	<i>E. coli</i>	1E06	7 L con flujo a 2 L/min	Alrousan et al., 2012
Fijo en acero inoxidable con forma helicoidal	<i>E. coli</i>	4.8E10 UFC	1.5 m ³ de Agua residual a 1.5 m ³ /hr	Yu et al., 2016
Fijo en paredes de tubo de un CPC	<i>E. coli</i>	1E06 UFC	7 L flujo a 2 L/min	Alrousan et al., 2012

Al emplear un soporte para fijar el fotocatalizador es importante revisar que toda la superficie se encuentre iluminada, que sea inerte a las especies existentes dentro de la matriz de agua y que evite el desprendimiento prematuro de la película que los recubre, para ello también es necesario vigilar la velocidad del flujo.

7.5 Concentración inicial del microorganismo

Una densidad bacteriana más alta significa que durante la desinfección fotocatalítica habrá una competencia más fuerte entre las bacterias vivas y los desechos bacterianos, inhibiendo la fotocatalisis (Kim et al., 2013). Además de que, la sola presencia de una mayor cantidad de bacterias también aumenta la turbiedad, lo que contribuye a la dispersión y atenuación de la luz (Ungria et al., 2016) La turbiedad es un factor crucial que afecta la desinfección fotocatalítica de bacterias en medios acuosos y se deben considerar estos aspectos:

1. Las propiedades fisicoquímicas de las partículas causantes de turbiedad.
2. La interacción entre el fotocatalizador y las bacterias (Fernández, 2005b; Juhua et al, 2021).
3. La adsorción de materiales o nutrientes orgánicos por las partículas causantes de turbiedad, lo que promueve el crecimiento de bacterias (Sánchez, 2011).
4. La interacción entre las partículas causantes de turbidez (incluidas las bacterias) y las partículas de fotocatalizador, que incluye el blindaje de las partículas de fotocatalizador y el bloqueo de la irradiación de luz incidente a los sitios reactivos del fotocatalizador (Fernández, 2005b).

La materia orgánica disuelta suele tener una alta afinidad por el TiO_2 , por lo que se puede utilizar como absorbente para la eliminación de materia orgánica disuelta en el momento sin irradiación de luz para tratar el agua potable (Gora y Andrews, 2017).

7.6 Fuente lumínica

Se encontró que se han realizado ensayos con diversos espectros de luz, aún con TiO_2 sin dopar. Del espectro electromagnético, 27 artículos ocupan UV-Vis, 16 artículos con UVA, 4 con UVB, 2 con UVC y 14 de los artículos solo mencionan luz UV. La intensidad de la irradiación lumínica es un factor importante capaz de acortar los tiempos de inactivación bacteriana a medida que se incrementa la intensidad lumínica. En la Figura 7.4, se observa el comportamiento de la inactivación fotocatalítica de la bacteria *E. coli* y la reducción del tiempo de contacto con el aumento de la cantidad de fotones emitida por una fuente de luz.

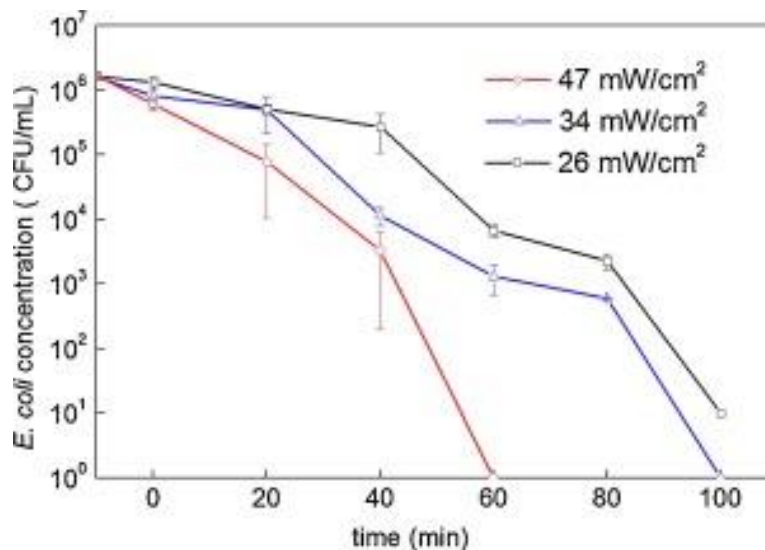


Figura 7.4 Dependencia de la cinética de inactivación bacteriana de la dosis de irradiación solar simulada aplicada sobre una muestra que contiene nanotubos de TiO₂- Ag3%-FeOx3% (Mangayayam et al., 2017)

La principal diferencia entre los ensayos realizados entre UV y UV-Vis es el tiempo, es menor con luz UV. La luz LED tanto blanca como UV ha demostrado una gran aportación para el avance de la desinfección y para reducir el consumo eléctrico (Liu et al., 2021; Buck et al., 2018; Pestana et al., 2015).

7.7 Matriz de agua

Los estudios fotocatalíticos en desinfección basados en TiO₂ han sido a la fecha, de acuerdo al presente estudio todas se desarrollan a escala laboratorio con condiciones controladas y simuladas, sin embargo, en ambientes reales, las complejidades en el contexto del agua superficial y residual pueden no ser fácilmente identificables o simulables. Por ello, es indispensable generar un avance considerable hacia las aplicaciones y los ensayos en dichas condiciones para ocasionar un avance en la investigación de la fotocatalisis, tal como lo sugieren todos los trabajos analizados. Es importante señalar que, para mantener a los microorganismos viables durante el tiempo que duren los ensayos de desinfección en condiciones controladas, el medio debe favorecer su permanencia, por lo que, a menudo se emplea una solución salina para mantener la presión osmótica, lo cual no ocurre en condiciones no controladas. Dentro de los trabajos reportados se emplean diversas soluciones salinas como la solución tamponada con fosfato PBS (Jeong et al., 2021) y caldo Luria-Bertani (Mac Mahon et al., 2017) para mantener a los organismos. De estas soluciones se toman las muestras a ocupar y se diluyen en otro medio acuoso como: agua destilada (Buck et al., 2018), desionizada (Zheng et al, 2018), ultrapura (Camacho-Muñoz et al, 2020), agua de lluvia (Saran, Arunkumary Devipriya, 2017), agua de grifo (Pinho et al., 2015), río (Murcia et al, 2017), pozo (Polo-López et al, 2010; Gosgot, 2018), laguna (Pestana et al,

2020), agua real de efluentes de plantas tratadoras de aguas residuales municipales, PTAR (Ángel, 2018) o agua residual sintética (Abeledo-Lameiro Ares-Mazás & Gómez-Couso, 2016). El pH de los ensayos se mantuvo entre 6 y 7, aunque hubo valores tan bajos como 4 para microcistinas (Khedr et al, 2019) y tan altos como 8.1 en una muestra de agua de río (Lanao et al, 2012).

Finalmente, la temperatura en ensayos con colectores cilindro parabólicos (CPC) se alcanzaron temperaturas de hasta 39.8°C (Agulló-Barceló et al, 2013), sin mostrar interferencias negativas para la desinfección fotocatalítica. El efecto de la temperatura puede ignorarse dentro del rango de 12 a 40 ° C para los experimentos de desinfección solar de acuerdo a Alrousan et al. (2012).

7.8 Mecanismos de acción

7.8.1 Virus

En Magaña et al., (2021) se menciona que, Zheng et al., (2018) se indica que la desinfección basada en TiO₂ resulta del daño ocasionado por el desinfectante a la cápside de naturaleza proteica generada por las ERO como la principal consecuencia de la remoción de organismos. No obstante, los virus con multicapa poseen una mayor capacidad de reparar sus genomas durante la replicación en el hospedero, con lo cual la eliminación del virus no se efectúa de manera efectiva (Beck et al., 2014). Miyauchi et al., (2020) apunta que los huecos fotogenerados en la banda de valencia del TiO₂ brinda un fuerte poder oxidante descomponiendo las moléculas orgánicas. Con ello, los componentes de la cápside son oxidadas bajo la radiación, resultando en la eliminación del virus. Sin embargo, el daño de la cápside (parcial o total), no necesariamente implica la inactivación del organismo. Ello, por no ser el elemento esencial limitante involucrado en el ciclo biológico del organismo, donde solo un daño en particular al material genético considerable con insuficiencia de acción de los mecanismos de reparación si constituyen su impedimento infectivo (Chen et al., 2010).

7.8.1 Bacterias

De acuerdo a Magaña et al., (2021), el mecanismo se explica debido a que el fenómeno de desinfección ocurre principalmente por la presencia de dos oxidantes fotoquímicos el radical OH⁻ y las ERO con alto poder oxidante. Kikuchi et al., (1997) propone que se debe principalmente asociada a la reacción de H₂O₂ y O₂ en un proceso difusivo sobre la membrana de la bacteria, que potencializa el efecto oxidante y en contraste los radicales libres OH⁻ que se unen a la superficie o reaccionan cerca de la pared celular dañándola debido a su potencial de oxidación (Foster et al., 2011). Lo anterior se propone mediante la reacción de Harber-Weiss ($O_2^{\bullet-} + H_2O_2 \rightarrow \bullet OH + OH^- + O_2$), aunque en Cho et al., (2004) se menciona que ello es difícil, ya que la reacción es baja, con ello no soportando el mecanismo. Por otro lado, en Laxma et al., (2017) se menciona que, en efecto la desinfección por efecto fotoquímico se produce por los radicales hidroxilos producidos en

la banda de valencia tienden a interactuar con la pared celular, lo cual reitera Schwegmann et al., (2012) menciona que el primer ataque por las ROS genera la oxidación de los componentes de la capa externa del organismo conformados por fosfolípidos poliinsaturados.

El mismo Schwegmann et al., (2012) señala que el posible contacto del organismo con el TiO₂ puede ser descrita por la teoría conocida como “DLVO”, que refiere a al acrónimo del expositor Derjaguin, Landau, Verwey and Overbeek. Ella propone que la suma de las fuerzas de Lifshitz/van der Waals promueven el contacto de las moléculas con poder oxidante con el organismo. Por otro lado, la teoría No-DLVO propone que las fuerzas como la hidratación y las fuerzas hidrofóbicas también juegan un rol importante sumando un término adicional a las energías de interacción de las propiedades polares de la superficie y el medio. Dicho proceso induce una fuga rápida de iones potasio del organismo, y así fenómenos de reducción/oxidación en la coenzima A. En consecuencia, se produce la incapacidad osmoregulatoria debida a la afectación de la membrana fosfolípídca (Laxma et al., 2017). En Magaña et al., (2021), se menciona que, para la membrana bacteriana es posible distinguir dos grupos a) Gram positivo y b) Gram negativo, que para fines de desinfección principalmente se basa en el contenido de peptidoglicano, que resulta superior en las primeras. Por otro lado, también sugiere que, bajo las mismas condiciones de aplicación, el fenómeno debe expresarse de manera menos significativa en organismos Gram negativo. Lo anteriormente mencionado se corrobora en Tallósy et al., (2014) que efectúa ensayos sobre *Staphylococcus aureus* requiere de dos horas para lograr una remoción de 99.99%, mientras que Rahimi et al., (2015) y Jia et al., (2016) que lo efectúan sobre *E. coli* requieren entre 240 y 440 minutos para lograr el mismo resultado.

7.9 Eficiencia de inactivación

De acuerdo a los documentos revisados en el presente trabajo, los ensayos reportados presentaron eficiencias de desinfección superiores al 50%, o bien alcanzaron el límite de detección o inclusive logrando ser no detectables por la técnica de estimación considerada dentro de sus particulares metodologías. Asimismo, todos los microorganismos estudiados resultaron ser susceptibles a la inactivación con los parámetros operacionales considerados dentro de los trabajos, reiterando que la gama de organismos empleados aún se encuentra restringida a algunos virus, bacterias y protozoarios. Es importante señalar que varios de ellos, tal como Fago MS2 (Liga et al., 2011), *E. coli*, *L. monocytogenes* y *S. typhimurium*, fueron inactivados en su totalidad, durante el primer minuto del ensayo (Kim et al., 2013), sin embargo otros como los ooquistos de *Cryptosporidium* con 300 min (Abeledo-Lameiro Ares-Mazás & Gómez-Couso, 2016), *C. albicans* con 720 min (Tzeng et al., 2021), *K. pneumoniae* con 900 min (Huang et al., 2020) y el Fago PR772 requirieron hasta 1300 minutos de irradiación (Misstear y Gill, 2012), mientras que, en general las cianobacterias con sus cianotoxinas, de acuerdo a su concentración inicial requirieron entre 4 y 15 minutos para oxidarse (Pestana et al., 2020; Khedr et al., 2019; Pestana et al., 2015) .

No obstante, Chen et al., (2010) realizó un ensayo con irradiación intermitente en el cual probó que las bacterias cuentan con mecanismos de autoprotección que ralentiza la desinfección fotocatalítica. En este estudio explica que, según el mecanismo de Gourmelon, la síntesis de las enzimas superóxido dismutasa constituye uno de los principales mecanismos de defensa de las células frente al estrés oxidativo al catalizar la desproporción de los aniones superóxido $O_2 \bullet^-$ (precursores de $\bullet OH$) en peróxido de hidrógeno y oxígeno molecular. Esta respuesta al estrés oxidativo ha sido bien caracterizada para algunos microorganismos y especialmente para las bacterias Gram negativas aerobias facultativas como *E. coli* (Egoburo et al., 2019). El detener la irradiación al inicio de la fotocatalisis favorece los mecanismos de autorreparación y, en consecuencia, aumenta el tiempo necesario para completar la desinfección

En el estudio de Lydakis-Simantitris et al., (2010), después de 60 min de desinfección, el grado de destrucción de coliformes y enterococos fue de aproximadamente 65 y 50%, respectivamente, independientemente del pH de la muestra inicial. Sin embargo, el pH ácido débil de 6,0 provocó un ligero aumento de la actividad bactericida. Curiosamente, las colas observadas en la curva de inactivación de los enterococos a pH 7 podrían deberse a la presencia de una pequeña subpoblación en la muestra de aguas residuales que es más resistente a los efectos de la fotocatalisis a pH neutro que la población a granel debido a su propiedades genéticas o morfológicas. En particular, incluso después de una irradiación prolongada y 1 g/L de TiO_2 P25, algunas células del agua natural analizada y las muestras de aguas residuales tratadas secundarias sobrevivieron (3% de los coliformes totales y 11% de los enterococos) las bacterias muertas y sus componentes intracelulares excretados compiten por el radical hidroxilo fotogenerado y/o forman una pantalla que impide la penetración de la luz, “protegiendo” así las bacterias activas restantes.

7.10 Modelos cinéticos reportados

Solo 16 artículos seleccionan el modelo que mejor se ajusta a sus resultados y presentan el valor de sus constantes cinéticas. En general, la fotodesinfección de agua sigue un comportamiento de pseudo primer orden que se guía por el modelo de Chick-Watson cuando la concentración bacteriana es menor o igual a $1E05$ UFC, como el mostrado en la Figura 7.5 en un reactor fotocatalizador inmovilizado con silicón bajo irradiación de luz visible (concentración bacteriana inicial = $\sim 10^5$ UFC / mL).

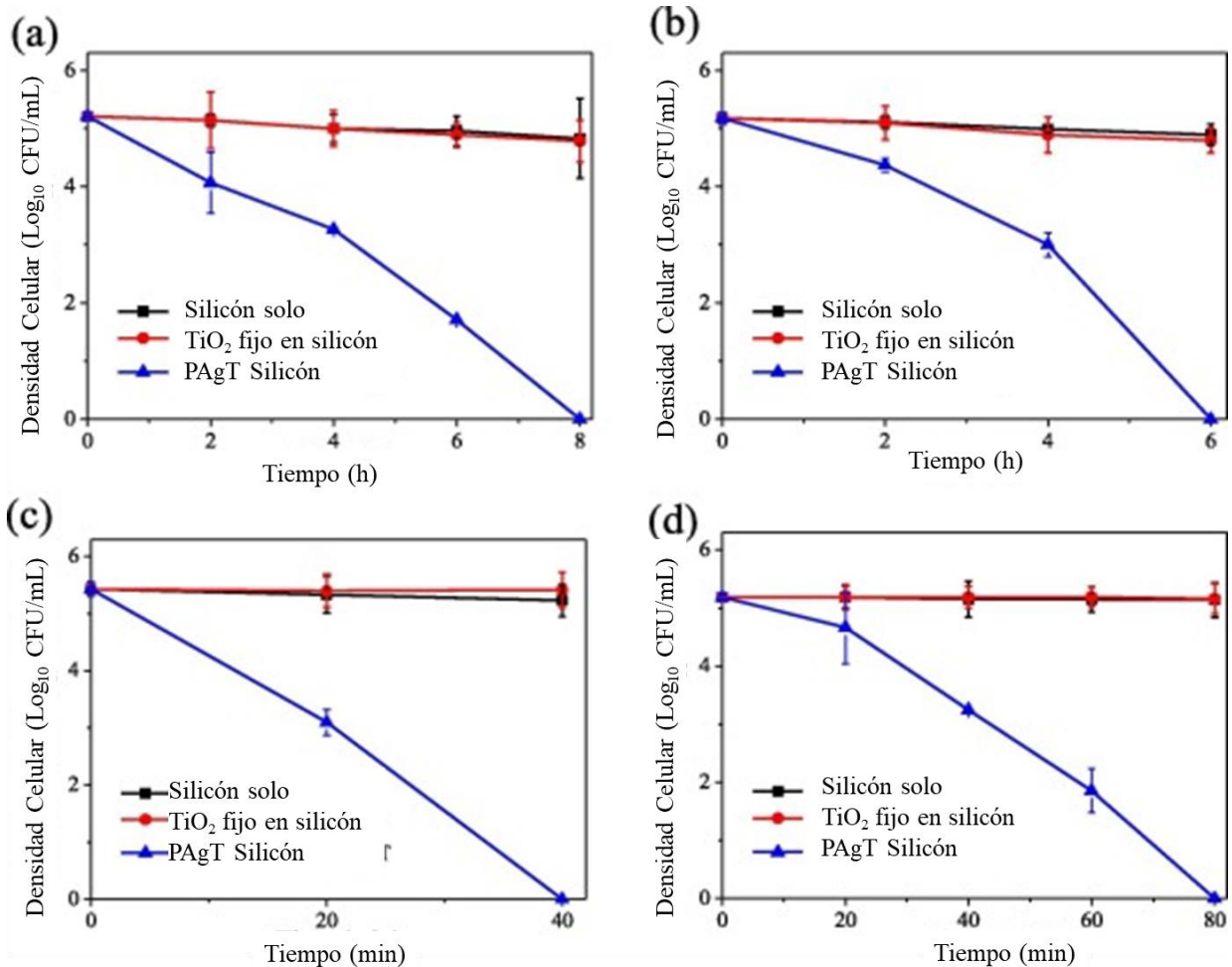


Figura 7.5 Inactivación fotocatalítica de (a) *Enterococcus sp.*, (b) *S. aureus*, (c) *E. coli* y (d) *Salmonella* (Liu et al., 2021)

En concentraciones bacterianas más altas o cuando el microorganismo cuenta con una membrana gruesa como los ooquistos de *Cryptosporidium*, generalmente, siguen el modelo de Hom modificado. Este modelo se propuso para identificar tres regiones durante el proceso de inactivación, donde los períodos de inactivación son las regiones de hombro, log-lineal y de cola, respectivamente, con las tres constantes cinéticas respectivas.

Rodríguez-Chueca et al., (2016) ofrece una gráfica donde se muestra claramente las tres zonas descritas en el modelo de Hom: “hombro”, log lineal y “cola” que pueden apreciarse en la Figura 7.6. El microorganismo de prueba es *E. coli* en una concentración de 1E06 UFC

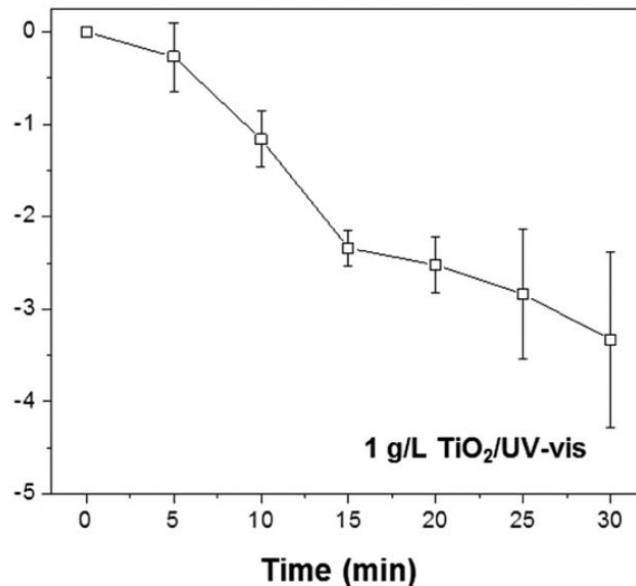


Figura 7.6 Inactivación de *E. coli* en muestras de agua dulce superficial con 1 g/L de TiO_2 e irradiación UV-Vis. Se puede observar claramente las tres zonas de “hombro”, log lineal y “cola” del modelo de Hom modificado (Rodríguez-Chueca et al., 2016)

7.11 Ventajas e inconvenientes

Dentro de las ventajas que representa la presente tecnología se observa un incremento en su estudio para lograr caracterizar los parámetros básicos que permitan comprender su funcionamiento y poder escalar su explotación. Lo anterior, se determina con base en el incremento de publicaciones y la frecuencia con la que se generan trabajos del uso del efecto fotocatalítico del TiO_2 para fines de eliminación de carga biológica en diversas matrices de agua, perfilándolo así, como una alternativa prometedora para efectuar desinfección de agua de diversas calidades. De hecho, la exploración en cuanto a la fijación del TiO_2 brinda una versatilidad de proceso, ya que se puede emplear en sistemas de flujo continuo con mayor volumen de agua (De La Cruz y Murcia, 2018; Yu et al., 2016), donde el dopaje incrementa la afinidad del fotocatalizador con los microorganismos, también, su capacidad de formar ERO con un alto poder desinfectante. El TiO_2 sin dopar es capaz de inactivar concentraciones bacterianas $> 1E05$ UFC (Tzeng et al., 2021; Ángel, 2018; De La Cruz y Murcia, 2018; Makropoulou, Panagiotopoulou & Venieri, 2018; Monteagudo et al., 2017; Murcia et al., 2017; Yu et al., 2016; Joost et al., 2015; Maldonado, Suárez y Miranda, 2015; Pestana et al., 2015; Pinho et al., 2015; Tsydenova, Batoev y Batoeva, 2015; Kim et al., 2013; Alrousan et al., 2012; Liu et al., 2012; Kowal et al., 2011; Chen et al., 2010; Polo-López et al., 2010).

Para *E. coli*, el tiempo de desinfección puede acortarse con dopaje (principalmente $Ag < 5\%$) y una intensidad de luz de entre $10 - 18 W/m^2$, pasando de 300 minutos (Alrousan et al., 2012) a tan solo 35 minutos de exposición con dopaje (Sreeja y Vidya, 2016) resultando así una tecnología conveniente. La exploración del dopaje con otros elementos, tal como Ag ofrece inactivación bacteriana aún es oscuridad, debido a la actividad bactericida de la plata (Mahmoudian-Boroujerd et al, 2018). Finalmente, una de las ventajas más considerables es que de manera adicional la fotocátalisis efectuada con TiO_2 es capaz de eliminar de manera adicional contaminantes orgánicos e inorgánicos (Monge et al., 2018)

Sin embargo, los inconvenientes radican en la comercialización de los catalizadores, ya que tienen una vida útil limitada, la reducción de su actividad catalítica a lo largo del tiempo y la degradación del material por envenenamiento, pérdida de masa y falta de limpieza (Dong et al., 2015). Una de las principales limitaciones radica en el hecho de que los resultados reportados en la literatura, sólo se evalúan a escala de laboratorio y rara vez a escala piloto. Lo anterior implica que su uso solo se demuestra en condiciones de calidad controlada y sin interferencias en el proceso evaluado, pudiendo así diferir de los resultados en entornos no controlados. Así entonces, los sistemas a escala de laboratorio requieren el espacio para el volumen del reactor, el de las lámparas, el de la automatización y de control del sistema (Cooper et al., 1997). De manera adicional, en el caso del dopaje con Ag, Fe, Cu, Ru, se debe medir la cantidad de lixiviados que se generan, ya que un inconveniente aun no estimado se compone por el efecto colateral que puedan ocasionar los agentes empleados en la técnica una vez liberados al ambiente. De hecho, el dopaje con rutenio no está recomendado para agua potable al formar compuestos muy solubles y difíciles de separar (Zheng et al., 2018). La limitación del uso de TiO_2 con luz solar, que permite su uso solo en un intervalo dentro del espectro UV, por lo tanto, se vuelve a exigir el dopaje, lo que aumenta aún más los costos del proceso, razón por la cual debe continuar explorándose para lograr un método seguro, estable y de bajo costo. Es importante señalar que existe un condicionamiento al clima y nubosidad prevalente para los sistemas que emplean luz solar natural para sus ensayos. Dentro de la elección del fotocatalizador se debe tener en cuenta la recuperación del mismo, ya que el método de *slurry* requiere un paso extra para la recuperación del fotocatalizador, mientras que la eficiencia disminuye en el caso del TiO_2 fijo, donde es necesario vigilar el desprendimiento de la superficie, para evitar su incorporación involuntaria al ambiente.

El equipo y la temperatura necesarios para alcanzar las condiciones necesarias para el método siguen siendo caros, en comparación con otros empleados con los mismos fines. La limitación de la relación costo-beneficio del uso de TiO_2 al encontrarse aún en fase de exploración básica presenta aún resultados no consistentes y predecibles. Todo ello, en conjunto, aun implica dificultades en términos de su asimilación tecnológica en relación al diseño de prototipos de sistemas con capacidades fotocatalíticas adecuadas para efectuar el fenómeno de desinfección por medio de fotocatálisis.

8. CONCLUSIONES

- Se define el estado del arte sobre el uso del efecto fotocatalítico del TiO₂ en desinfección de agua y se encontró que los principales métodos de obtención/ síntesis del TiO₂ son: 1) Obtención directa del fabricante para emplearse tanto en reactores de lecho fluidizado como en reactores de lecho fijo. 2) El método sol-gel es el más utilizado para la síntesis de TiO₂ granular, seguido por la síntesis de nanotubos y nanofibras. El dopaje y la calcinación se plantean como estrategia para definir la estructura cristalina del fotocatalizador y favorecer el efecto fotocatalítico. 3) Los reactores de lecho fijo presentan avances en cuanto a la capacidad volumétrica del agua a tratar y el uso de superficies como vidrio, cuarzo, silicón, acero inoxidable, tubos de CPC, perlita expandida y acetato celulosa para fijar el fotocatalizador.
- El método Cochrane Prisma 2021 para el periodo estudiado permitió direccionar y reducir el tiempo invertido en investigación, logrando encontrar un total de 67 trabajos aplicado a 27 microorganismos diferentes. El listado lo conforman virus (enterovirus), bacterias (enterobacterias antropogénicas y no antropogénicas, termotolerantes y florecientes con nutrientes que proceden de fuentes antropogénicas, asociadas a alimentos y contaminantes emergentes), ooquistos de protozoarios y hongos oportunistas antropogénicos. El organismo más empleado en los ensayos de desinfección, resultó ser *E. coli*. Las diversas matrices de agua que componen los ambientes estudiados incluyen: superficiales, subterráneas, de pozo, de grifo, con ácido húmico, residual farmacéutica y efluentes secundarios de PTAR, logrando un efecto desinfectante sobre todos los organismos de prueba, alcanzando inclusive su eliminación total en tiempos de exposición que van desde el primer minuto para algunas bacterias, tal como *E. coli*, hasta 1300 min para el Fago PR772.
- Los parámetros operacionales con mayor impacto en un proceso fotocatalítico con TiO₂ para desinfección fotocatalítica en agua son: 1) la concentración inicial del microorganismo, 2) la concentración del fotocatalizador, 3) la intensidad de la radiación UV en mW/cm², 4) el tiempo de radiación y 5) la configuración del reactor, 6) el pH del agua y 7) el dopado con Plata, Cobre y Aluminio aumenta la generación de especies oxidantes, superando así las interferencias que pueda proveer el agua real de una PTAR, residual farmacéutica y de un río contaminado con agua residual.
- Se encontró que la desinfección fotocatalítica puede seguir dos mecanismos de acuerdo al tamaño de la partícula del fotocatalizador: 1) Adsorción y oxidoreducción cuando la partícula de TiO₂ es mayor al tamaño del microorganismo, 2) Invasión al interior de la célula y oxidoreducción cuando el tamaño de la partícula menor que el microorganismo y el fotocatalizador puede permear la pared celular. La fotodesinfección de agua sigue un comportamiento de pseudo primer orden que se guía por el modelo de Chick-Watson cuando la concentración bacteriana es menor o igual a 1E05 UFC y sigue el modelo de Hom modificado para concentraciones bacterianas más altas o en microorganismos con membranas gruesas, tal como ooquistos de *Cryptosporidium* sp.
- La desinfección fotocatalítica del agua se muestra como una alternativa prometedora con fines de desinfección por ser capaz de eliminar un amplio espectro de organismos de interés sanitario, sin embargo, la tecnología aún se encuentra en una etapa básica se

investigación aunado al alto costo que e incertidumbre de resultados que implica actualmente su aplicación. No obstante, a futuro puede ser capaz de brindar agua segura para uso y consumo humano, aumentar la eficiencia de desinfección en una PTAR y contribuir a la seguridad hídrica de aguas superficiales que reciben aguas residuales tratadas.

ANEXO

TABLA 7.1

Tabla 7.1. Resultados del meta-análisis documental sobre la aplicación del efecto fotocatalítico de TiO₂ en la desinfección de agua en la década 2010 - 2020.

Método de Síntesis u obtención del fotocatalizador	Microorganismos de prueba en desinfección fotocatalítica	Parámetros de control						Eficiencia de inactivación		Constantes cinéticas	Referencia	
		Carga de fotocatalizador	Concentración Inicial del Microorganismo	Fuente de luz	Intensidad de luz	Matriz de agua	pH	Tiempo	Reducción de poblaciones			
			mg/L									PFU o CFU/ mL
Ni-TiO ₂ Evonik Aeroxide P25 fotodepositado en malla	<i>Escherichia coli</i>	2% en peso de malla	1E07	UVA	0.24	PBS + Agua desionizada	ND	30	4.96 log	ND	Jeong et al., 2021	
	<i>Legionella thermalis</i>		1E05					75	5 log			
	Fago MS2		1E07					5	5 log			
TiO ₂ Sol gel	<i>Staphylococcus aureus</i>	1000	1E05	UV-Vis	7.25	agua desionizada estéril	5.2	360	7.5 log	ND	Tzeng et al., 2021	
	<i>Escherichia coli</i>							Caldo de cultivo	720			2 log
	<i>Mycobacterium avium</i>											2.3 log
	<i>Candida albicans (fungi)</i>											1 log
TiO ₂ -Turmalina 4% sol gel	<i>Staphylococcus aureus</i>	1000	1E05	UV-Vis	7.25	agua desionizada estéril	5.2	360	7.4 log	ND	Tzeng et al., 2021	
	<i>Escherichia coli</i>							Caldo de cultivo	720			4.6 log
	<i>Mycobacterium avium</i>											2.8 log
	<i>Candida albicans (fungi)</i>											3.9 log

Abreviaturas de la tabla:

PFU: Unidades formadoras de placa (virus)
 CFU: Unidades formadoras de colonias (bacterias)
 PBS: Solución salina tampón fosfato
 NMP: Número más probable (bacterias)
 min: minutos
 log: unidades logarítmicas

ND: Datos no disponibles
 UVA: Radiación ultra violeta (315 a 400 nm)
 UVB: Radiación ultra violeta (280-315 nm)
 UVC: Radiación ultra violeta (100-280 nm)
 UV-Vis: Espectro visible (400-700 nm)
 VT: Volumen total
 fg/μL: concentración de ADN

Tabla 7.1. Resultados del meta-análisis documental sobre la aplicación del efecto fotocatalítico de TiO₂ en la desinfección de agua en la década 2010 - 2020.

Método de Síntesis u obtención del fotocatalizador	Microorganismos de prueba en desinfección fotocatalítica	Parámetros de control						Eficiencia de inactivación		Constantes cinéticas	Referencia
		Carga de fotocatalizador	Concentración Inicial del Microorganismo	Fuente de luz	Intensidad de luz	Matriz de agua	pH	Tiempo	Reducción de poblaciones		
			mg/L								
Sistema P/Ag/Ag ₂ O/ Ag ₃ PO ₄ /TiO ₂	<i>Enterococcus Sp.</i>	6 mL titanato de tetrabutilo, AgNO ₃ y Ag ₃ PO ₄ slurry	1E05	UV-Vis	Luz LED 750 W/m ²	PBS + Agua desionizada	ND	360	>99%	ND	Liu et al., 2021
	<i>Staphylococcus aureus</i>							180	>99%		
	<i>Escherichia coli</i>							20	>99%		
	<i>Salmonella</i>							30	>99%		
	<i>Enterococcus Sp.</i>	6 mL titanato de tetrabutilo, AgNO ₃ y Ag ₃ PO ₄ inmovilizado en silicón						480	>99%		
	<i>Staphylococcus aureus</i>							360	>99%		
	<i>Escherichia coli</i>							40	>99%		
	<i>Salmonella</i>							80	>99%		
TiO ₂ sol-gel	microcistina-LR	fijo en la pared exterior de 30 tubos de vidrio	3 µg/mL	UVA	36 W	agua ultrapura, VT= 84 mL, flujo 1 L/min	7	36%	ND	Camacho-Muñoz et al., 2020	
	Cilindrospermopsina							23.2%			
	microcistina-LR					agua ultrapura + H ₂ O ₂ , VT= 84 mL, flujo 1 mL/min	ND	49.3%			
	Cilindrospermopsina							48.9%			

Tabla 7.1. Resultados del meta-análisis documental sobre la aplicación del efecto fotocatalítico de TiO₂ en la desinfección de agua en la década 2010 - 2020.

Método de Síntesis u obtención del fotocatalizador	Microorganismos de prueba en desinfección fotocatalítica	Parámetros de control						Eficiencia de inactivación		Constantes cinéticas	Referencia
		Carga de fotocatalizador	Concentración Inicial del Microorganismo	Fuente de luz	Intensidad de luz	Matriz de agua	pH	Tiempo	Reducción de poblaciones		
			mg/L		PFU o CFU/ mL						
TiO ₂ Hombikat K01 / C	<i>Microcistina</i> MC-LR	Lecho empacado de flujo continuo	30 µg/ L	UV	ND	Agua pura	8	14	80%	ND	Pestana et al., 2020
	<i>Microcistina</i> MC-YR							15	40%		
	<i>Microcistina</i> MC-LA							14	51%		
	<i>Microcistina</i> MC-RR							14	28%		
TiO ₂ -N	<i>Klebsiella pneumoniae</i>	1200	1.00E05	UV	7.25 W / cm ²	Agua estéril, solución salina tamponada con fosfato estéril PBS. VT= 100 mL	6.4	900	>99%	K1=13, k2=0.00032 K3=1.40	Huang et al., 2020
TiO ₂ -N-Turmalina		1200	1.00E05					750	>99%	K1=14.9 k2=0.00034 K3=1.38	
TiO ₂ -C		1200	1.00E05					500	>99%	K1=14.8 k2=0.00039 K3=1.39	
TiO ₂ -C-Pd		120	1.00E05					250	>99%	K1=0-6, k2=0.00042, K3=1	

Tabla 7.1. Resultados del meta-análisis documental sobre la aplicación del efecto fotocatalítico de TiO₂ en la desinfección de agua en la década 2010 - 2020.

Método de Síntesis u obtención del fotocatalizador	Microorganismos de prueba en desinfección fotocatalítica	Parámetros de control						Eficiencia de inactivación		Constantes cinéticas	Referencia
		Carga de fotocatalizador	Concentración Inicial del Microorganismo	Fuente de luz	Intensidad de luz	Matriz de agua	pH	Tiempo	Reducción de poblaciones		
			mg/L		PFU o CFU/mL						
TiO ₂	Coliformes totales	1000	620	UV-Vis	14 W	Agua de Pozo VT=20 mL	6.9	60	53.7%	ND	Cabañas, Mota y Ruiz, 2019
Nanofibras de Cu-TiO ₂ Diámetro de 80 nm	Fago f2	20	1.00E05	UV-Vis	120	Agua ultra pura	7	120	>99%	ND	Cheng et al., 2019
						Ácido húmico 15 mg/L	7	120	1,89 log		
						Ácido húmico 5 mg/L	5	120	3.2 log		
TiO ₂ -C-N sin recocer	Microcistina MC-LR	300	10 mg/L	UV-Vis	1	Solución acuosa de microcistina-LR	6.3	180	95%	0.034	Khedr et al., 2019
TiO ₂ -C-N sin recocer		400					4	120	>99%		
TiO ₂ -C-N sin recocer		400					30 mg/L	4	180		
TiO ₂ P25	<i>Escherichia coli</i>	1000	1.00E06	LED	5.59E-08 Einstein	100 mL agua destilada estéril	4	120	100*	ND	Buck et al., 2018
	<i>Staphylococcus epidermidis</i>			6 lámparas UVA	6.8E-5 Einstein		4	120	50*		
							4	120	60*		

* Los valores corresponden a la concentración final medida después de la desinfección

Tabla 7.1. Resultados del meta-análisis documental sobre la aplicación del efecto fotocatalítico de TiO₂ en la desinfección de agua en la década 2010 - 2020.

Método de Síntesis u obtención del fotocatalizador	Microorganismos de prueba en desinfección fotocatalítica	Parámetros de control						Eficiencia de inactivación		Constantes cinéticas	Referencia
		Carga de fotocatalizador	Concentración Inicial del Microorganismo	Fuente de luz	Intensidad de luz	Matriz de agua	pH	Tiempo	Reducción de poblaciones		
			mg/L								
TiO ₂ con filtro de malla y filtro multicapa	<i>Pseudomona aeruginosa</i>	TiO ₂ que trabaje a 1000 m ³ /h	2.50E11	UVC	1000 W	VT= 55 galones, flujo 15 gal/min	ND	30	99%	ND	De La Cruz y Murcia, 2018
	30							>99%			
TiO ₂	<i>Escherichia coli</i> , Enterobacterias, <i>Klebsiella</i> y <i>Pseudomonas</i> , identificadas por el manual BIOXON	30	3.60E08	UV-Vis	1000W	Efluente planta tratadora VT= 0.85L	7.6	30	99.99%	ND	Ángel, 2018
Efluente planta tratadora VT= 1 L								300	>99%		
Efluente planta tratadora VT= 0.85L								30	99.99%		
Efluente planta tratadora VT= 1 L								300	99.36%		
TiO ₂ -ZnO											
TiO ₂	Virus Hepatitis B	1500	3E04 fg/μL	UV-Vis	4 lámparas de 36W a 15 cm	Agua residual farmacéutica	6	720	20%	ND	Mahmoudian -Boroujerd et al., 2018
TiO ₂ - Ag 1.5%								720	90%		
TiO ₂ -Ag 1.5%		2000	540					90%			

Tabla 7.1. Resultados del meta-análisis documental sobre la aplicación del efecto fotocatalítico de TiO₂ en la desinfección de agua en la década 2010 - 2020.

Método de Síntesis u obtención del fotocatalizador	Microorganismos de prueba en desinfección fotocatalítica	Parámetros de control						Eficiencia de inactivación		Constantes cinéticas	Referencia
		Carga de fotocatalizador	Concentración Inicial del Microorganismo	Fuente de luz	Intensidad de luz	Matriz de agua	pH	Tiempo	Reducción de poblaciones		
			mg/L								
TiO ₂	Coliformes termotolerantes	6000	2E06 NMP	UV-Vis	100 -1000 W/m ²	Efluente de planta tratadora de aguas residuales VT= 12 L	6.58	240	99%	ND	Najarro, 2018
	Coliformes totales		2.4E06 NMP						99%		
TiO ₂	<i>Escherichia coli</i>	50	1E06	UVA	1.31 E-02 W/m ²	Solución salina NaCl 0.8% VT 300mL	7.2 a 7.4	60	>99%	0.46	Makropoulou Panagiotopoulou y Venieri, 2018
TiO ₂ Aeroxide P25									5.5 log	0.14	
TiO ₂ - N 25% (NH ₃)									>99%	0.59	
TiO ₂ - N 25% (Urea)									>99%	0.67	
TiO ₂ - N (Tetraetilamina)									>99%	0.58	
TiO ₂	<i>Pseudomona aeruginosa</i>	50	1E06	UVA	1.31 E-02 W/m ²	Solución salina NaCl 0.8% VT 300mL	7.2 a 7.4	30	>99%	0.13	Makropoulou Panagiotopoulou y Venieri, 2018
TiO ₂ Aeroxide P25									>99%	0.12	
TiO ₂ - N 25% (NH ₃)									>99%	0.14	
TiO ₂ - N 25% (Urea)									>99%	0.26	
TiO ₂ - N (Tetraetilamina)									>99%	0.2	
TiO ₂	<i>Bacillus cereus</i>	100	1.50E04	UVA	1.31 E-02 W/m ²	Solución salina NaCl 0.8% VT 300mL	7.2 a 7.4	60	2 log	0.6	Makropoulou Panagiotopoulou y Venieri, 2018
TiO ₂ Aeroxide P25									1.5 log	0.33	
TiO ₂ - N 25% (NH ₃)									2 log	0.81	
TiO ₂ - N 25% (Urea)									4 log	0.86	
TiO ₂ - N (Tetraetilamina)									2.5 log	0.81	
TiO ₂	<i>Bacillus cereus</i>	100	1.00E04	UVA	1.31 E-02 W/m ²	Solución salina NaCl 0.8% VT 300mL	7.2 a 7.4	60	>99%	0.13	Makropoulou Panagiotopoulou y Venieri, 2018
TiO ₂ Aeroxide P25									>99%	0.13	

Tabla 7.1. Resultados del meta-análisis documental sobre la aplicación del efecto fotocatalítico de TiO₂ en la desinfección de agua en la década 2010 - 2020.

Método de Síntesis u obtención del fotocatalizador	Microorganismos de prueba en desinfección fotocatalítica	Parámetros de control						Eficiencia de inactivación		Constantes cinéticas	Referencia
		Carga de fotocatalizador	Concentración Inicial del Microorganismo	Fuente de luz	Intensidad de luz	Matriz de agua	pH	Tiempo	Reducción de poblaciones		
			mg/L								
TiO ₂	Coliformes totales	1000	1.8 NMP	UV-Vis	44 W/m ²	Agua de pozo VT= 1.5 L	6.15	480	85.8%	ND	Gosgot, 2018
	Coliformes Fecales							480	99.8%		
	<i>Escherichia coli</i>							480	81.8%		
Nanofibras de 100 nm de Cu- TiO ₂	Fago f2	50	1E04	UV-Vis	100	Agua desionizada	7	120	>99%	ND	Zheng et al., 2018
		75 a 150	1E05					120	>99%		
		50						6 a 9	240		
		50			120			>99%			
		50			120			>99%*			
	<i>Escherichia coli</i>	50	100	7	120	>99%					
	*A una temperatura de 35°C										
TiO ₂ P25	<i>Staphylococcus aureus</i>	50	1E07	UV-Vis	1.31E-02 W/ m ²	Solución salina 0.8% VT=300 mL	7.2 a 7.4	28	2.5 log	ND	Venieri et al., 2017
TiO ₂ - Al 0.04%		20						45	5.8 log		
TiO ₂ - Al 0.04%		50						10	6 log		
TiO ₂ - Cr 0.04%		20						30	>99%		
TiO ₂ - Fe 0.04%		20						18	6 log		
TiO ₂ - Fe 3%		50		12.74 W/m ²	60	3 log					

Tabla 7.1. Resultados del meta-análisis documental sobre la aplicación del efecto fotocatalítico de TiO₂ en la desinfección de agua en la década 2010 - 2020.

Método de Síntesis u obtención del fotocatalizador	Microorganismos de prueba en desinfección fotocatalítica	Parámetros de control						Eficiencia de inactivación		Constantes cinéticas	Referencia					
		Carga de fotocatalizador	Concentración Inicial del Microorganismo	Fuente de luz	Intensidad de luz	Matriz de agua	pH	Tiempo	Reducción de poblaciones							
			mg/L									PFU o CFU/ mL	mW/cm ²	min		
TiO ₂ P25 Evonic	<i>Escherichia coli</i>	1000	2.99E05	UV	30 W/cm ²	Agua de río contaminado con aguas residuales urbanas. VT= 250 mL	300	7.5	150*	ND	Murcia et al., 2017					
TiO ₂ desnudo								6.8	100*							
TiO ₂ - S sulfatado								6.5	100*							
TiO ₂ - 0.5% Au								6.9	100*							
TiO ₂ - 0.5% Pt								6.9	0*							
TiO ₂ P25 Evonic	3.7E05		7.5					110								
TiO ₂ desnudo			6.8					500*								
TiO ₂ - S sulfatado			6.3					300*								
TiO ₂ - 0.5% Au			6.9					300*								
TiO ₂ - 0.5% Pt			6.9					650*								
TiO ₂ P25 Evonic	7.8E05		120 W/m ²		UV			30 W/cm ²	Agua de río contaminado con aguas residuales urbanas. VT= 250 mL			300	7.5	300*	ND	Murcia et al., 2017
TiO ₂ desnudo													6.8	290*		
TiO ₂ - S sulfatado													6.5	250*		
TiO ₂ - 0.5% Au													6.9	290*		
TiO ₂ - 0.5% Pt													6.9	120*		
TiO ₂ - 0.5% Pt	<i>Escherichia coli</i>	2.99E05					7.2			0*						
	Enterobacterias	3.70E05					7.2			90*						
	Coliformes totales	7.80E05					7.2			65*						
TiO ₂ - 2% Pt	<i>Escherichia coli</i>	2.99E05					7.2			0*						
	Enterobacterias	3.70E05					7.2			10*						
	Coliformes totales	7.80E05				7.2	0*									

* El valor de la remoción presentada en toda esta sección corresponde a las UFC detectadas después de la desinfección

Tabla 7.1. Resultados del meta-análisis documental sobre la aplicación del efecto fotocatalítico de TiO₂ en la desinfección de agua en la década 2010 - 2020.

Método de Síntesis u obtención del fotocatalizador	Microorganismos de prueba en desinfección fotocatalítica	Parámetros de control						Eficiencia de inactivación		Constantes cinéticas	Referencia
		Carga de fotocatalizador	Concentración Inicial del Microorganismo	Fuente de luz	Intensidad de luz	Matriz de agua	pH	Tiempo	Reducción de poblaciones		
			mg/L								
TiO ₂ P25 Evonik fijo en Tubos CPC de borosilicato por pulverización	<i>Escherichia coli</i>	0.6 mg/cm ²	2E06	UV-Vis	10-27 W/m ²	Agua sintética** VT=50L		80	99.1%	ND	Monteagudo et al., 2017
** El agua sintética consistió en peptona (32 mg/L), extracto de carne (25 mg/L), urea (6 mg/L), CaCl ₂ · 2H ₂ O (3 mg L ⁻¹) y MgSO ₄ · 7H ₂ O (2 mg/L). El agua sintética se diluyó con agua del grifo hasta un valor de carbono orgánico total (COT) de 5 mg/L. También se añadieron al agua aproximadamente 5 mg/L de antipirina. La mezcla proporcionó un valor de TOC de aproximadamente 10 mg/L											
TiO ₂ Rutilo a 700°C en slurry	<i>Escherichia coli</i>	50	1E06	UVA	31.3	Caldo LB + agua destilada estéril para E.Coli.	ND	81	4 log	1.14	Mac Mahon et al., 2017
	Fago MS2				26.35			7.5	3 log		
	Fago ΦX174		1E05		26.35			< 20	3 log		
	Fago PR772				30.01			42	3 log		
TiO ₂ + Rutenio (bpy)3C 2 en slurry	<i>Escherichia coli</i>	50 + 2.5	1E06		24.06	VT= 15L flujo= 9 L/min		37	4 log	6.32	

Tabla 7.1. Resultados del meta-análisis documental sobre la aplicación del efecto fotocatalítico de TiO₂ en la desinfección de agua en la década 2010 - 2020.

Método de Síntesis u obtención del fotocatalizador	Microorganismos de prueba en desinfección fotocatalítica	Parámetros de control						Eficiencia de inactivación		Constantes cinéticas	Referencia
		Carga de fotocatalizador	Concentración Inicial del Microorganismo	Fuente de luz	Intensidad de luz	Matriz de agua	pH	Tiempo	Reducción de poblaciones		
			mg/L								
NT - TiO ₂	<i>Escherichia coli</i>	ND	1E06	UV	46.5	caldo Luria-Bertani (LB) se preparó en agua Millipore	6.8	80	0.5 log	ND	Mangayayam et al., 2017
NT - TiO ₂ - Ag (3%)								80	1 log		
NT - TiO ₂ - Ag (3%) -FeOx (3%)								60	>99%		
								100	5 log		
								100	>99%		
								60	>99%		
TiO ₂ - Ag TiO ₂ con 5 mL de Isopropóxido de Titanio	<i>Escherichia coli</i>	TiO ₂	4E05	UV-Vis	ND	CPC de 16L, agua de grifo esterilizada enriquecida con microorganismos total 20 L de agua	6.9	45	>99%	ND	Saran , Arunkumar y Devipriya, 2017
		Ag TiO ₂						30	>99%		
	Fago MS2	TiO ₂	3E05					90	>99%		
		Ag TiO ₂						60	>99%		
	<i>Aspergillus niger</i>	TiO ₂	5E04					120	60%		
		Ag TiO ₂						90	>99%		
	Recuento Bacteriano total	TiO ₂	3E03				120	>99%			
		Ag TiO ₂					90	>99%			
	Coliformes Totales	TiO ₂	4E02				90	>99%			
		Ag TiO ₂					60	>99%			

Tabla 7.1. Resultados del meta-análisis documental sobre la aplicación del efecto fotocatalítico de TiO₂ en la desinfección de agua en la década 2010 - 2020.

Método de Síntesis u obtención del fotocatalizador	Microorganismos de prueba en desinfección fotocatalítica	Parámetros de control						Eficiencia de inactivación		Constantes cinéticas	Referencia
		Carga de fotocatalizador	Concentración Inicial del Microorganismo	Fuente de luz	Intensidad de luz	Matriz de agua	pH	Tiempo	Reducción de poblaciones		
			mg/L								
TiO ₂ fijo en pared exterior tubos de cuarzo de 30 cm	<i>Norovirus murino</i>	Espesor de 0.7 - 0.9 mm	6.5 log	UVB	4.5	agua desionizada + PBS. VT= 30L	7.4	20	3.31 log**		Sun-Hyoung et al., 2017
			6.1 log					5*	> 5.51 log		
* A una presión de 500 Mpa											
** El valor de la remoción presentada en toda esta sección corresponde a las UFC detectadas después de la desinfección.											
TiO ₂ -F-Ce en Perlita expandida	Cianobacterias <i>Microcystis aeruginosa</i>	4000	2.7E06	UV-Vis	calcinada a 450°C	PBS	ND	540	>99%	ND	Wang et al., 2017
					calcinada a 550°C			180	95%		
TiO ₂ -Ag 1%	<i>Escherichia coli</i>	500	2400	UV-Vis	300 - 1000 W/m ²	Agua tratada efluente PTAR enriquecida. VT= 100 mL	ND	240	>99%	ND	Rodríguez, 2016
TiO ₂	<i>Cryptosporidium parvum</i> , Ooquistes	100	ND	UV lámpara de arco de xenón	33 W / m ²	agua destilada, PBS	8	300	98%	ND	Abeledo-Lameiro Ares-Mazás y Gómez-Couso, 2016
		200							88%		
		300							30%		
		400							20%		

Tabla 7.1. Resultados del meta-análisis documental sobre la aplicación del efecto fotocatalítico de TiO₂ en la desinfección de agua en la década 2010 - 2020.

Método de Síntesis u obtención del fotocatalizador	Microorganismos de prueba en desinfección fotocatalítica	Parámetros de control						Eficiencia de inactivación		Constantes cinéticas	Referencia
		Carga de fotocatalizador	Concentración Inicial del Microorganismo	Fuente de luz	Intensidad de luz	Matriz de agua	pH	Tiempo	Reducción de poblaciones		
			mg/L								
TiO ₂ Panreac 20% Rutilo, 80% Anatasa	<i>Escherichia coli</i>	1000 + 0.04 mM de H ₂ O ₂	1.00E06	UV - vis	ND	agua dulce superficial VT=200 mL	7.7	30	0.99 log*	0.002	Rodríguez- Chueca et al., 2016
		1000						30	3.4 log		
* El valor de la remoción presentada en toda esta sección corresponde a las UFC detectadas después de la desinfección											
Película TiO ₂	<i>Staphylococcus aureus</i> 956	Titanato de tetrabutilo al 5% sobre vidrio mediante sol-gel, recocido a 450°C,	200	UVA	4.5	PSS solución salina fisiológica estéril	ND	15	65%	ND	Pleskova et al., 2016
	<i>Staphylococcus aureus</i> 455								50%		
	<i>Staphylococcus epidermidis</i>								65%		
	<i>Micrococcus</i> spp								75%		
	<i>Enterococcus faecium</i>								62.5%		
	<i>Enterococcus faecalis</i>								65%		
	<i>Escherichia coli</i>								57.5		
	<i>Pseudomona aeruginosa</i>								67.5%		
	<i>Klebsiella oxytoca</i>								55%		
	<i>Klebsiella pneumoniae</i>								45%		
	<i>Proteus vulgaris</i>	50%									
<i>Staphylococcus aureus</i> 956	nanoporos formados con pulso láser.							73%			

Tabla 7.1. Resultados del meta-análisis documental sobre la aplicación del efecto fotocatalítico de TiO₂ en la desinfección de agua en la década 2010 - 2020.

Método de Síntesis u obtención del fotocatalizador	Microorganismos de prueba en desinfección fotocatalítica	Parámetros de control						Eficiencia de inactivación		Constantes cinéticas	Referencia
		Carga de fotocatalizador	Concentración Inicial del Microorganismo	Fuente de luz	Intensidad de luz	Matriz de agua	pH	Tiempo	Reducción de poblaciones		
			mg/L								
TiO ₂ -C	<i>Listeria monocytogenes</i>	1000	10E05	UVA, UVB	1.2E-06 Einstein/L s	Agua ultrapura	7.1	90	2.4 log	ND	Shim et al., 2016
TiO ₂ - Ag en slurry	<i>Escherichia coli</i>	400	4E09	UV	18 W	Agua esterilizada VT= 250 mL	7	60	>99%	ND	Sreeja y Vidya, 2016
		1000						35	>99%	0.102	
		100	1E04					25	>99%	ND	
			1E05					30	>99%		
			1E06					35	>99%		
			1E07					35	70%		
			1E08					35	40%		
			120					85%	0.0168		
		200	4E09					120	>99%	ND	
		300						80	>99%		
400	100	>99%									
TiO ₂ - Ag fijo en acetato de celulosa		400									

Tabla 7.1. Resultados del meta-análisis documental sobre la aplicación del efecto fotocatalítico de TiO₂ en la desinfección de agua en la década 2010 - 2020.

Método de Síntesis u obtención del fotocatalizador	Microorganismos de prueba en desinfección fotocatalítica	Parámetros de control						Eficiencia de inactivación		Constantes cinéticas	Referencia
		Carga de fotocatalizador	Concentración Inicial del Microorganismo	Fuente de luz	Intensidad de luz	Matriz de agua	pH	Tiempo	Reducción de poblaciones		
			mg/L								
TiO ₂ fijo en acero inoxidable helicoidal	<i>Escherichia coli</i>	ND	2.42E06	UV	42,7 mJ/cm ²	1.5 m ³ de Agua residual	ND	60	3.05 log	ND	Yu et al., 2016
			4.80E10					60	9700*		
* Concentración final medida después de la desinfección.											
TiO ₂ Photospheres de 40 micrones Anatasa >99%	Nodularin	1% peso volumen	10 µg /ml	UV LED	12,05 mW	solución de una variante de microcistina o nodularina. VT= 3 mL	ND	4	No detectable	ND	Pestana et al., 2015
	Microcistina-RR							3			
	Microcistina-LR							5			
	Microcistina-RR desmetilada							4			
	Microcistina-LA							4			
	Microcistina-HtyR							5			
	Microcistina-LR desmetilada							5			
	Microcistina-LR metilada							4			
	Microcistina-YR							4			
	Microcistina-LY							2			
	Microcistina-LW							2			
	Microcistina-LF							2			
TiO ₂ Degussa P25 en slurry	Microcistina-LR		11 µg /ml	UV LED	450 W			12	82%		
			10 µg /ml	UV LED	12,05 mW			5	No detectable		
			11 µg /ml	UV LED	450 W		5.3	12	No detectable		

Tabla 7.1. Resultados del meta-análisis documental sobre la aplicación del efecto fotocatalítico de TiO₂ en la desinfección de agua en la década 2010 - 2020.

Método de Síntesis u obtención del fotocatalizador	Microorganismos de prueba en desinfección fotocatalítica	Parámetros de control						Eficiencia de inactivación		Constantes cinéticas	Referencia
		Carga de fotocatalizador	Concentración Inicial del Microorganismo	Fuente de luz	Intensidad de luz	Matriz de agua	pH	Tiempo	Reducción de poblaciones		
			mg/L								
Mn / Co- TiO ₂	Fago MS2	100 con 1% de Mn	1E05	UV-Vis	0,75	Aguas residuales antes de la cloración	ND	60	3.8 log	ND	Venieri et al., 2015
		100 con 0.1% de Mn/Co						45	>99%		
		100 con 0.1% de Mn/Co						60	2.4 log		
Ag+Anatasa-Rutilo Aldrich	<i>Escherichia coli</i>	1000 50 mg en 5 mL	1.50E08	UV-Vis	lámpara de mercurio de 400W	Solución salina 8.5% VT=5 mL	ND	60	5 log	ND	Kowalska et al., 2015
Ag+ TiO ₂ Rutilo									3 log		
Ag+ TiO ₂ Rutilo-Anatasa									2 log		
Ag+UFR Rutilo									1.5 log		
Ag+Rutilo-anatasa Aldrich									1 log		
Rutilo New Castle University (UFR)				60				6log			
TiO ₂ Anatasa Ishihara								6 log			
Rutilo-anatasa Aldrich propanol								5.9 log			
Anatasa-Rutilo Aldrich								5 log			
Rutilo-anatasa Aldrich								4 log			

Tabla 7.1. Resultados del meta-análisis documental sobre la aplicación del efecto fotocatalítico de TiO₂ en la desinfección de agua en la década 2010 - 2020.

Método de Síntesis u obtención del fotocatalizador	Microorganismos de prueba en desinfección fotocatalítica	Parámetros de control						Eficiencia de inactivación		Constantes cinéticas	Referencia
		Carga de fotocatalizador	Concentración Inicial del Microorganismo	Fuente de luz	Intensidad de luz	Matriz de agua	pH	Tiempo	Reducción de poblaciones		
			mg/L								
TiO ₂	<i>Escherichia coli</i>	500	1E08	UVA	16 W/m ²	Solución salina NaCl 0.9% VT= 1100 mL	ND	30	6.5 log	ND	Escuadra, S. et al., 2015
	<i>Enterococcus sp</i>	1000						30	7.5 log		
	<i>Escherichia coli</i>	1000	1E05			Efluente PTAR fortificada		60	0.9 log		
	<i>Enterococcus sp</i>	500	1E06					60	1.5 log		
TiO ₂ P25 Degussa Portuguesa	<i>Microcystis aeruginosa</i>	100	1E06	UV-Vis	7 a 30 W/m ²	Agua de grifo enriquecida cianobacterias, VT= 20L	7.7	16	>99%	ND	Pinho et al., 2015
		200						12	>99%		
	<i>Cylindrospermopsis raciborskii</i>	200	~70 µg/L					12	60%		
TiO ₂	<i>Escherichia coli</i>	1000	1E06	UV vis	ND	PBS VT= 100 mL	6.3	180	0.5 log	ND	Khraisheh et al., 2015
TiO ₂ -Cu 1% imp. húmedo						60		>99%			
TiO ₂ -Cu 2% imp.en húmedo						180		60%			
TiO ₂ -Cu 10% imp. en húmedo						180		50%			
TiO ₂ -Cu(NO ₃) ₂ sol-gel						60		>99%			
TiO ₂ -CuCl ₂ 0.5% sol-gel						180		>99%			
TiO ₂ -Cu(NO ₃) ₂ sol-gel						120		>99%			
TiO ₂ -Cu(NO ₃) ₂ sol-gel						180		>99%			
	180	>99%									
	180	>99%									

Tabla 7.1. Resultados del meta-análisis documental sobre la aplicación del efecto fotocatalítico de TiO₂ en la desinfección de agua en la década 2010 - 2020.

Método de Síntesis u obtención del fotocatalizador	Microorganismos de prueba en desinfección fotocatalítica	Parámetros de control						Eficiencia de inactivación		Constantes cinéticas	Referencia	
		Carga de fotocatalizador	Concentración Inicial del Microorganismo	Fuente de luz	Intensidad de luz	Matriz de agua	pH	Tiempo	Reducción de poblaciones			
			mg/L									PFU o CFU/mL
TiO ₂ Inmovilizado	<i>Escherichia coli</i>	10	1E06	UVA	30-65 W/m ²	Agua destilada enriquecida VT= 100mL	ND	180	>99%	ND	Maldonado, Suárez y Miranda. (2015)	
TiO ₂ esferas 6mm		10		UV-Vis	ND			120	>99%			
TiO ₂ slurry		5						60	>99%			
TiO ₂ Degussa P25	<i>Salmonella typhimurium</i>	1000	1E06	UV-Vis	1000 W/m	Agua sintética + Resorcinol/ Hidroquinona VT= 80 mL	ND	120	3.5 log	ND	Tsydenova, Batoev & Batoeva, 2015	
	<i>Escherichia coli</i>							120	>99%			
	<i>Escherichia coli</i> + 17 α -ethynylestradiol (0.1 mg/L)							1E03	90			95%
	<i>Escherichia coli</i> + Resorcinol/Hidroquinona/catecol							1E07	40			>99%
TiO ₂ Degussa P25	Cilindrospermopsina	200	10 mg/L	UVA	71,7 μ W/cm ²	Aolución acuosa de cilindrospermopsina, VT= 5 ML	ND	15	>99%	ND	Fotiou et al., 2015	
TiO ₂ Kronos vlp-7000				Luz visible 435 nm	107 mW/cm ²			10	< 10%			
				Luz solar	85 mW/cm ²			20	>99%			
				Luz solar	86 mW/cm ²			120	>99%			
				Luz visible 435 nm	108 mW/cm ²			10	15%			
				UVA 365 nm	71,7 μ W/cm ²			40	>99%			

Tabla 7.1. Resultados del meta-análisis documental sobre la aplicación del efecto fotocatalítico de TiO₂ en la desinfección de agua en la década 2010 - 2020.

Método de Síntesis u obtención del fotocatalizador	Microorganismos de prueba en desinfección fotocatalítica	Parámetros de control						Eficiencia de inactivación		Constantes cinéticas	Referencia
		Carga de fotocatalizador	Concentración Inicial del Microorganismo	Fuente de luz	Intensidad de luz	Matriz de agua	pH	Tiempo	Reducción de poblaciones		
			mg/L								
Películas TiO ₂ Degussa P25	<i>Escherichia coli</i>	NA	7.90E07	UVA	22 W/m ²	NaCl + Agua MilliQ	ND	5	2E07*	ND	Joost et al., 2015
			7.90E07					10	1.3E06*		
			7.90E07					20	>99%		
*Concentración final, medida después de la desinfección.											
TiO ₂ sol-gel	<i>Escherichia coli</i>	2 mL de TiCl ₄ 99%	2.2 log	UV-Vis	lámpara halógena 90 W	NaCl, PBS		120	0.1 log	0.001	Ashkarran et al., 2014
TiO ₂ - N30%								120	1.6 log	0.0158	
TiO ₂ - Ag								120	1.2 log	0.0119	
TiO ₂ - N30% - Ag								120	1.8 log	0.0173	
TiO ₂ - 0.2% Platino	<i>Escherichia coli</i>	4.2 g/m ²	3.5E7 en 50 mL	UV-Vis	2.7 a 3.99 W/m ²	NaCl 0.9%		120	3.4log	ND	Caballero et al., 2014
TiO ₂ - 0.85% Carbono		1.6 g/m ²						120	1 log		
TiO ₂ - 0.49% Carbono		1.6 g/m ²						120	1.4 log		
TiO ₂ - 0.1% Nitrógeno		1.6 g/m ²						120	0.25 log		

Tabla 7.1. Resultados del meta-análisis documental sobre la aplicación del efecto fotocatalítico de TiO₂ en la desinfección de agua en la década 2010 - 2020.

Método de Síntesis u obtención del fotocatalizador	Microorganismos de prueba en desinfección fotocatalítica	Parámetros de control						Eficiencia de inactivación		Constantes cinéticas	Referencia
		Carga de fotocatalizador	Concentración Inicial del Microorganismo	Fuente de luz	Intensidad de luz	Matriz de agua	pH	Tiempo	Reducción de poblaciones		
			mg/L								
TiO ₂ - Mn 0.1%	<i>Klebsiella pneumoniae</i>	250	1.00E05	UV-Vis	5,80E-7 Einstein/Ls 1,31E-2 W / m ²	200 mL de agua esteril	ND	10	>99%	ND	Venieri et al., 2014
TiO ₂ - Co 1%								10	>99%		
TiO ₂								30	>99%		
TiO ₂ - Mn 0.1 y 0.3%	<i>Escherichia coli</i>	100	1.00E05	UV-Vis	5,80E-7 Einstein/Ls 1,31E-2 W / m ²	200 mL de agua esteril	ND	10	>99%	ND	Venieri et al., 2014
TiO ₂ - Co 1%								15	>99%		
TiO ₂								30	100		
TiO ₂ -Ni 3% Sol-gel	<i>Staphylococcus aureus</i>	200	1.00E06	UV-vis	0.5	Solución salina NaCl 0.9% VT=5 mL	7	250	>99%	ND	Hemraj et al., 2014
	<i>Bacillus subtilis</i>							240	>99%		
	<i>Escherichia coli</i>							300	3.6 log		
	<i>Salmonella abony</i>							350	3.6 log		
TiO ₂ P25	<i>Pseudomonas fluorescens</i>	200	1.00E07	UV	400 μW/cm ²	Agua desionizada estéril NaCl 0.9%		120	>99%	ND	Wang et al., 2014
	<i>Macrocooccus caseolyticus</i>		1.00E07								
TiO ₂ slurry	Escherichia coli resistente a antibióticos	50	1E7 = 0.5 McFarland	UV-Vis	250W	Efluente aguas residuales urbanas 0.5 L	7.9	60	2 log	ND	Rizzo et al., 2014
								60	>99%		

Tabla 7.1. Resultados del meta-análisis documental sobre la aplicación del efecto fotocatalítico de TiO₂ en la desinfección de agua en la década 2010 - 2020.

Método de Síntesis u obtención del fotocatalizador	Microorganismos de prueba en desinfección fotocatalítica	Parámetros de control						Eficiencia de inactivación		Constantes cinéticas	Referencia
		Carga de fotocatalizador	Concentración Inicial del Microorganismo	Fuente de luz	Intensidad de luz	Matriz de agua	pH	Tiempo	Reducción de poblaciones		
			mg/L								
TiO ₂ Evonik en suspensión	<i>Escherichia coli</i>	100	1.00E05	UVA	38 W/m ² promedio, con valores máximos de 50 W/m ²	efluente secundario real de una planta de tratamiento de aguas residuales municipal VT= 10L, flujo 10L/min	7.3	300	>99%	0.0135	Agulló-Barceló et al., 2013
	Esporas de clostridios reductores de sulfito (SRC)		1.10E03					300	1 log	0.0022	
	colifagos somáticos (SOMCPH)		1.10E04					300	2 log	0.0141	
	Bacteriófagos de ARN específico F (FRNA)		1.10E03					300	90%	0.0627	
TiO ₂	<i>Agrobacterium tumefaciens</i>	1000 P25	3.60E08	UVA	0.64	PBS + Agua desionizada	ND	20	80%	ND	Aminedi et al., 2013
		1000 Nanobarras						20	60%		
		1000 Nanotubos						20	50%		
TiO ₂ (Degussa Co., Incheon, Corea)	Fago MS2	1000	1E08	UVA	1379	PBS	7.2	120	4 log	-0.0049	Lee y Ko, 2013
			1E08	UVB	367			80	4 log	-0.0057	
	1E06		1379		210			5 log	-0.0029		
			367		30			4 log	0.0123		
	Norovirus murino MNV		1492		Agua subterránea	80		4 log	-0.0028		
			325		30	4 log		-0.0123			

Tabla 7.1. Resultados del meta-análisis documental sobre la aplicación del efecto fotocatalítico de TiO₂ en la desinfección de agua en la década 2010 - 2020.

Método de Síntesis u obtención del fotocatalizador	Microorganismos de prueba en desinfección fotocatalítica	Parámetros de control						Eficiencia de inactivación		Constantes cinéticas	Referencia
		Carga de fotocatalizador	Concentración Inicial del Microorganismo	Fuente de luz	Intensidad de luz	Matriz de agua	pH	Tiempo	Reducción de poblaciones		
			mg/L								
Película TiO ₂	<i>Escherichia coli</i> resistente a antibióticos	1000	6E04	UVA LED	8	agua destilada estéril 30 mL, PBS	ND	86	3 log	ND	Xiong y Hu, 2013
					7			104	3 log		
					6			145	3 log		
Películas de TiO ₂ con ACVD. Tetraisopropóxido de titanio (TTIP) sobre vidrio de aluminosilicato recubierto con óxido de indio (ITO) dopado con estaño	<i>Escherichia coli</i>	columna 500°C	1E08	UV	lámpara arco Xe de 450 W	caldo en polvo Luria-Bertani (Caldo LB) VT=50mL	ND	120	40%	0.02	Park et al., 2013
		Granular 450°C						60	80%	0.075	
		Ramificado 450°C						60	90%	0.055	
Película TiO ₂	<i>Escherichia coli</i>	50 mm de TiCl ₄	1E06	UVA	8	NaCl 0.85%	ND	180	2 log	ND	Kim et al., 2013
	<i>Listeria monocytogenes</i>							180	2.5 log		
	<i>Salmonella typhimurium</i>			180	1.5 log						
	<i>Escherichia coli</i>			10	>99%						
	<i>Listeria monocytogenes</i>			9	>99%						
	<i>Salmonella typhimurium</i>			5	>99%						
	<i>Escherichia coli</i>			1	>99%						
	<i>Listeria monocytogenes</i>			1	>99%						
<i>Salmonella typhimurium</i>	1	>99%									
	<i>Escherichia coli</i>	0.5 mg/cm ²	1E06		12 - 18 W/m ²			300	4.5 log	0.0089	

Tabla 7.1. Resultados del meta-análisis documental sobre la aplicación del efecto fotocatalítico de TiO₂ en la desinfección de agua en la década 2010 - 2020.

Método de Síntesis u obtención del fotocatalizador	Microorganismos de prueba en desinfección fotocatalítica	Parámetros de control						Eficiencia de inactivación		Constantes cinéticas	Referencia
		Carga de fotocatalizador	Concentración Inicial del Microorganismo	Fuente de luz	Intensidad de luz	Matriz de agua	pH	Tiempo	Reducción de poblaciones		
			mg/L								
TiO ₂ fijo en tubos de vidrio recocido a 450 °C				UV-Vis	10 - 15 W/m ²	Solución salina NaCl 0.9% VT=7 L, flujo 2 L/min		300	4 log	0.0119	Alrousan et al., 2012
								210	>99%	0.012	
								210	>99%	0.011	
TiO ₂ Degussa P25 Aeroxide 80% anatasa, 20% rutilo	Fago MS2	50	1E05		17 W/m ²	CPC a escala laboratorio y completa, Agua destilada 2,8 L / min con depósito de 1L		15	3 log	ND	Missteary Gill, 2012
	Fago ΦX174							345	3 log		
	Fago PR772							1300	1 log		
	Fago MS2			5	3 log						
	Fago ΦX174			10	3 log						
	Fago PR772			32	3 log						
TiO ₂ Panreac en slurry	<i>Enterococcus</i> sp	1000 + 0.04 mM H ₂ O ₂	1E08	UVA	500 W/m ²	agua natural de río VT= 1L	8.1	30	1.9 log	ND	Lanao et al., 2012
		1000						30	2.4 log		
		1001 + 0.04 mM H ₂ O ₂		UVB				30	5.5 log		
		1001						30	6 log		
TiO ₂ Degussa	<i>Escherichia coli</i>	100	1E06	lámparas fluoresce	2.7	agua de dilución		120	3.6 log	0.0603	Suri, Thornton y

Tabla 7.1. Resultados del meta-análisis documental sobre la aplicación del efecto fotocatalítico de TiO₂ en la desinfección de agua en la década 2010 - 2020.

Método de Síntesis u obtención del fotocatalizador	Microorganismos de prueba en desinfección fotocatalítica	Parámetros de control						Eficiencia de inactivación		Constantes cinéticas	Referencia
		Carga de fotocatalizador	Concentración Inicial del Microorganismo	Fuente de luz	Intensidad de luz	Matriz de agua	pH	Tiempo	Reducción de poblaciones		
		mg/L	PFU o CFU/mL		mW/cm ²						
		300		ntes de 88 W		tamponada a partir de agua Milli-Q equilibrada con aire			2.9 log	ND	Muruganandham, 2012
TiO ₂ Aldrich									1.9 log	0.321	
TiO ₂ - Ag 0.5% Aldrich									4 log	0.076	
TiO ₂ - Pt 1% Aldrich		100				Agua de grifo			1.5 log	ND	
						Agua de estanque			2.4 log		
						efluente secundario de PTAR			2.5 log		
TiO ₂ - Ag 0.5% aldrich						agua de dilución tamponada a partir de agua Milli-Q equilibrada con aire			3 log		
TiO ₂ - Pt 5% Aldrich			1.30E06	UV-Vis	55,82				4 log		
	<i>Escherichia coli</i>		1.00E06	UV Vis			ND	180	90%	1.08	

Tabla 7.1. Resultados del meta-análisis documental sobre la aplicación del efecto fotocatalítico de TiO₂ en la desinfección de agua en la década 2010 - 2020.

Método de Síntesis u obtención del fotocatalizador	Microorganismos de prueba en desinfección fotocatalítica	Parámetros de control						Eficiencia de inactivación		Constantes cinéticas	Referencia
		Carga de fotocatalizador	Concentración Inicial del Microorganismo	Fuente de luz	Intensidad de luz	Matriz de agua	pH	Tiempo	Reducción de poblaciones		
		mg/L	PFU o CFU/ mL		mW/cm ²						
TiO ₂ coprecipitación simple recocido a 550°C		0.01 g/10mL		UVC	Lámpara Philips, Polonia, 9 vatios a una distancia de 30 cm	Caldo nutritivo (NB) + agua esterilizada		45	>99%	2.22	Liu et al., 2012
TiO ₂ - Ag coprecipitación simple, sinterizado a 550°C Anatasa				UV-Vis				15	99%	6.67	
				UV-C				15	>99%	6.67	
TiO ₂ recocido	<i>Staphylococcus aureus</i>	375 µg/mL	0,5 McFarland = 1.5E08	UVA	1.5	NaCl 85%	ND	20	>99%	ND	Kowal et al., 2011
Ag - TiO ₂ recocido		1500 µg/mL						75%			
Ag - TiO ₂ amorfo								75%			
nAg/ TiO ₂ (P25) reducción fotoquímica de nitrato de plata	Fago MS2	100 Degussa P25	7E07	UVA	2.5	Agua ultra pura	ND	5.1	4 log	0.13	Liga et al., 2011
		100 - 2,46% nAg / P25 TiO ₂						3.9		0.17	
		100 - 4,36% nAg / P25						1.9		0.35	
		100 - 5,95% nAg / P25						0.75		0.89	
		100 - Anatasa Alfa Aesar						16		0.004	
		100 - 3,94% nAg/A-TiO ₂						2.8		0.024	

Tabla 7.1. Resultados del meta-análisis documental sobre la aplicación del efecto fotocatalítico de TiO₂ en la desinfección de agua en la década 2010 - 2020.

Método de Síntesis u obtención del fotocatalizador	Microorganismos de prueba en desinfección fotocatalítica	Parámetros de control						Eficiencia de inactivación		Constantes cinéticas	Referencia
		Carga de fotocatalizador	Concentración Inicial del Microorganismo	Fuente de luz	Intensidad de luz	Matriz de agua	pH	Tiempo	Reducción de poblaciones		
			mg/L								
TiO ₂	<i>Escherichia coli</i>	500	7.70E08	UV	0.2	PBS	7.2	150	5 log	0.055	Xiong et al., 2011
TiO ₂ - Ag 3%								150	6 log		
Película TiO ₂ isopropóxido de titanio	<i>Escherichia coli</i>	1000	1E07	UVA	3.4E-5 Einsteins/sL	Agua Sintética NaCl 0.9%	30	93.5%	ND	Chen et al., 2010	
	<i>Staphylococcus aureus</i>										>99%
	<i>Escherichia coli</i>	15	1E05								>99%
	<i>Staphylococcus aureus</i>										>99%
	<i>Escherichia coli</i>										92.6%
	<i>Staphylococcus aureus</i>										94.2%
TiO ₂ 100% Anatasa	<i>Clostridium perfringens vegetativas</i>	1000	1E08	UV	500 W/m ²	Agua de río	7.8	5	6 log	ND	Lanao et al., 2010
			1E03			0.04 mM de H ₂ O ₂		5	7 log		
	Agua de río					30		1.3 log			
	0,04mM de H ₂ O ₂		30			1.1 log					

Tabla 7.1. Resultados del meta-análisis documental sobre la aplicación del efecto fotocatalítico de TiO₂ en la desinfección de agua en la década 2010 - 2020.

Método de Síntesis u obtención del fotocatalizador	Microorganismos de prueba en desinfección fotocatalítica	Parámetros de control						Eficiencia de inactivación		Constantes cinéticas	Referencia
		Carga de fotocatalizador	Concentración Inicial del Microorganismo	Fuente de luz	Intensidad de luz	Matriz de agua	pH	Tiempo	Reducción de poblaciones		
		mg/L	PFU o CFU/mL		mW/cm ²						
TiO ₂ Anatasa-Rutilo 100% Anatasa 100% Rutilo	Coliformes totales y <i>Enterococcus</i> sp.	1000 Anatasa 75% Rutilo 25%	Coliformes 144 - 160 y Enterococos 20 a 32	UVA	4,69E-06 Einstein / s = 0.1 mW/cm ²	Agua de manantial	7.1 - 7.5	15	C- 140 Ent 15*	ND	
		1000 Rutilo 100%						15	C 90 Ent 5	0.049	
		1000 Anatasa 100%						15	C 100 Ent 5	0.041	
		1000 Anatasa 75% Rutilo 25%	Coliformes 1484 - 1752 Enterococos 284 - 348				Agua residual tratada secundaria	7.4 - 7.8	15	C 1300 Ent 200	0.061
		1000 Rutilo 100%								C 700 Ent 150	0.025
		1000 Anatasa 100%								C 800 Ent 150	0.031
		500 Anatasa 75% Rutilo 25%							15	C 600 Ent200	0.041
		1000 Anatasa 75% Rutilo 25%							6	60	C 550 Ent100

Tabla 7.1. Resultados del meta-análisis documental sobre la aplicación del efecto fotocatalítico de TiO₂ en la desinfección de agua en la década 2010 - 2020.

Método de Síntesis u obtención del fotocatalizador	Microorganismos de prueba en desinfección fotocatalítica	Parámetros de control						Eficiencia de inactivación		Constantes cinéticas	Referencia
		Carga de fotocatalizador	Concentración Inicial del Microorganismo	Fuente de luz	Intensidad de luz	Matriz de agua	pH	Tiempo	Reducción de poblaciones		
			mg/L								
Película TiO ₂ P25*	Ooquistes <i>Cryptosporidium parvum</i>	1 mg/cm ²	5.00E05	UVA	24.7 W/m ²	solución Ringer NaCl 0.9%, Kcl 0.042%, CaCl ₂ 0.025%	7.2	180	78.4%	ND	Sunnotel et al., 2010
* Deposición electroforética sobre Vidrio de borosilicato recubierto de óxido de estaño dopado con indio.											
TiO ₂ P25 en Slurry	esporas de <i>Fusarium equiseti</i> M2T1b macroconidios	35	1200	UV-Vis	27 W/m ²	Agua destilada Volumen Total= 0.2L	6	285	>99%	ND	Polo-López et al., 2010
	esporas de <i>Fusarium equiseti</i> M3T1b clamidosporas	35			27 W/m ²			285	1.4 log		
	esporas de <i>Fusarium equiseti</i> FE3 clamidosporas y macroconidios	35			30 W/m ²			240	>99%		
	esporas de <i>Fusarium solani</i> FS12 microconidios	100	1E03	ND	Agua destilada	6.1	180	Menor al límite de detección			
		50	1.52E03		Agua de Pozo	7.9	240				
	esporas de <i>Fusarium equiseti</i> M2T1b macroconidios	100	1E02		Agua de Pozo	7.9	180				
		100	1E02		Agua destilada	6.2	180				
	esporas de <i>Fusarium equiseti</i> M3T1b clamidosporas	100	1E02		Agua de Pozo	7.9	240				
	100	1E02	Agua destilada	6.1	240						

REFERENCIAS

1. Abeledo-Lameiro, Elvira Ares-Mazás, Hipólito Gómez-Couso, *Evaluation of solar photocatalysis using TiO₂ slurry in the inactivation of Cryptosporidium parvum oocysts in water*, Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology, Volume 163, 2016, Pages 92-99, ISSN 1011-1344, <https://doi.org/10.1016/j.jphotobiol.2016.08.016>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1011134416302755>)
2. Acero, J. L., Benitez, F. J., Real, F. J., Roldan G., Rodriguez, E., *Chlorination and bromination kinetics of emerging contaminants in aqueous systems*, Chemical Engineering Journal, Volume 219, 2013, Pages 43-50, ISSN 1385-8947, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1385894713000053>
3. Agulló-Barceló, M.I. Polo-López, F. Lucena, J. Jofre, P. Fernández-Ibáñez, *Solar Advanced Oxidation Processes as disinfection tertiary treatments for real wastewater: Implications for water reclamation*, Applied Catalysis B: Environmental, Volumes 136–137, 2013, Pages 341-350, ISSN 0926-3373, <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2013.01.069>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926337313001057>)
4. Alós, J. (2015, 1 diciembre). Resistencia bacteriana a los antibióticos: una crisis global | Enfermedades Infecciosas y Microbiología Clínica. Elsevier. <https://www.elsevier.es/es-revista-enfermedades-infecciosas-microbiologia-clinica-28-articulo-resistencia-bacteriana-los-antibioticos-una-S0213005X14003413>
5. Alrousan, Polo-López, Dunlop, Fernández-Ibáñez, Byrne, *Solar photocatalytic disinfection of water with immobilised titanium dioxide in re-circulating flow CPC reactors*, Applied Catalysis B: Environmental, Volume 128, 2012, Pages 126-134, ISSN 0926-3373, <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2012.07.038>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926337312003840>)
6. Aminedi, R., Wadhwa, G., Das, N. et al., *Actividad bactericida dependiente de la forma del TiO₂ para la destrucción de bacterias Gram negativas Agrobacterium tumefaciens bajo irradiación con antorcha UV*. Environ Sci Pollut Res 20, 6521–6530 (2013). <https://doi.org/10.1007/s11356-013-1717-7>
7. Ángel Hernández, Berenice. Fotodegradación de contaminantes presentes en el efluente de la PTAR San Francisco de la ciudad de Puebla, mediante catalizadores de TiO₂ y ZnO/TiO₂. 2018. Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. Instituto de ciencias. Posgrado en ciencias. Puebla, México. Tesis de maestría. <https://repositorioinstitucional.buap.mx/handle/20.500.12371/7381>

8. AQUA-España. (2018, 14 octubre). Píldora de Conocimiento 14: Biocidas oxidantes y no oxidantes para el tratamiento del agua | Aqua España. Aqua España- Píldora de conocimiento. Recuperado 7 de septiembre de 2021, de https://aquaespana.org/sites/default/files/documents/files/Pildora_14-Biocidas_oxidantes_no_oxidantes_0.pdf
9. Ashkarran A., Habib Hamidinezhad, Hedayat Haddadi, Morteza Mahmoudi, *Double-doped TiO₂ nanoparticles as an efficient visible-light-active photocatalyst and antibacterial agent under solar simulated light*, Applied Surface Science, Volume 301, 2014, Pages 338-345, ISSN 0169-4332, <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2014.02.074>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169433214003675>)
10. Bataller, M. O., Fernández, L., & Véliz, E. (2010, febrero). *Eficiencia y sostenibilidad del empleo del ozono en la gestión de los recursos hídricos*. SciELO. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-49992010000100007
11. Beck, S.E.; Rodriguez, R.A.; Linden, K.G.; Hargy, T.M.; Larason, T.C.; Wright, H.B. Wavelength dependent UV inactivation and DNA damage of adenovirus as measured by cell culture infectivity and long range quantitative PCR. Environ. Sci. Technol. 2014, 48, 591–598 doi:10.1021/es403850b <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/24266597/>
12. Bolaños, R., & Calderón, M. (2014, enero). Introducción al meta-análisis tradicional. SciELO. Recuperado 8 de septiembre de 2021, de http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:FAeUowlAZakJ:www.scielo.org.pe/scielo.php%3Fscript%3Dsci_arttext%26pid%3DS1022-51292014000100007+&cd=1&hl=es-419&ct=clnk&gl=mx
13. Bosoquet, G. L. (2003, 1 marzo). *Antisépticos y desinfectantes* | Offarm. Elsevier.es. Recuperado 12 de junio de 2021, de <https://www.elsevier.es/es-revista-offarm-4-articulo-antisepticos-desinfectantes-13044452>
14. Buck C., Nathan Skillen, Peter K.J. Robertson, Jeanette M.C. Robertson, *Influence of bacterial, environmental and physical factors in design of photocatalytic reactors for water disinfection*, Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry, Volume 366, 2018, Pages 136-141, ISSN 1010-6030, <https://doi.org/10.1016/j.jphotochem.2018.04.030>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1010603017315812>)
15. Caballero, K.A. Whitehead, N.S. Allen, J. Verran, *Photocatalytic inactivation of Escherichia coli using doped titanium dioxide under fluorescent irradiation*, Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry, Volume 276, 2014, Pages 50-57,

ISSN 1010-6030, <https://doi.org/10.1016/j.jphotochem.2013.11.017>.
(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1010603013004966>)

16. Cabañas Vargas, Dulce Diana; Mota Poot, Valeria; Ruiz Espinoza, Juan Enrique. *Luz solar y TiO₂ para eliminar patógenos contenidos en agua de pozo: comportamiento de la fotocatalisis*. Revista académica Ingeniería, vol. 23, núm. 1, 2019, ISSN: 1665-529X, Universidad Autónoma de Yucatán México. n: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=46760427001>
17. Calicó Bosch, I. y Servicio de Microbiología. Ciutat Sanitària Vall d'Hebron, Barcelona. (2018). Diagnóstico de las infecciones por adenovirus. Sociedad Española Enfermedades Infecciosas Microbiología Clínica. <https://www.seimc.org/contenidos/ccs/revisionestematicas/viromicromol/adeno.pdf>
18. Camacho-Muñoz, Anne-Sophie Fervers, Carlos J. Pestana, Christine Edwards, Linda A. Lawton, *Degradation of microcystin-LR and cylindrospermopsin by continuous flow UV-A photocatalysis over immobilised TiO₂*, Journal of Environmental Management, Volume 276, 2020, 111368, ISSN 0301-4797, <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111368>.
(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301479720312937>)
19. Candal, R. J., Bilmes, S. A., & Blesa, M. A. (2004). *Eliminación de Contaminantes por Fotocatálisis Heterogénea*, 2a Edición. (N.o 4-Semiconductores con Actividad Fotocatalítica). CYTED, Argentina.
<https://www.psa.es/en/projects/solwater/files/CYTED01/10cap04.pdf>
20. Cantoral Uriza, E. A., Ascencio Martínez, A. D., & Aboal Sanjurjo, M. (2017, mayo). *Cianotoxinas: efectos ambientales y sanitarios. Medidas de prevención*. SciELO. Recuperado 21 de octubre de 2021, de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-88972017000200241
21. Castillo, N. (2021, 22 marzo). Microorganismos en el agua ¿Debemos preocuparnos? Ciencia UNAM. Recuperado 25 de octubre de 2021, de <http://ciencia.unam.mx/leer/1098/microorganismos-en-el-agua-debemos-preocuparnos->
22. Castillo Reyes, M. (2014, 18 noviembre). *Propuesta de manejo de residuos de lámparas ahorradoras en la UAM – Azcapotzalco*. Energía UAM Azcapotzalco. http://energia.azc.uam.mx/images/PDF/ProyecINVES/Tec_Sust/Propuesta-de-manejo-de-residuos-de-lmparas-ahorradoras-en-la-UAM-Azcapotzalco.pdf
23. Castillo González, J. A. (2016, noviembre). *Evaluación de la autofagia en la muerte celular inducida por cobre*. Universidad Autónoma de Nuevo León - Facultad de

medicina. Recuperado 11 de junio de 2021, de <http://eprints.uanl.mx/13793/1/1080238141.pdf>

24. Castro, E. (2004). Principios de control microbiológico con oxidantes. Muy ilustre colegio oficial de farmacéuticos de Valencia - MICOF. Recuperado 11 de junio de 2021, de <https://www.micof.es/bd/archivos/archivo1956.pdf>
25. CEPAL. (2020, 4 abril). La pandemia del COVID-19 profundiza la crisis de los cuidados en América Latina y el Caribe. Comisión Económica Para América Latina y El Caribe. Recuperado 7 de septiembre de 2021, de <https://repositorio.cepal.org/handle/11362/45335>
26. Cerda L, Jaime, y Valdivia C, Gonzalo. (2007). *John Snow, la epidemia de cólera y el nacimiento de la epidemiología moderna*. Revista chilena de infectología, 24(4), 331-334. <https://dx.doi.org/10.4067/S0716-10182007000400014>
27. Chacón-Jiménez, L. (2020, marzo). *Resistencia a desinfectantes y su relación con la resistencia a los antibióticos*. SciELO. https://www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0001-60022020000100007
28. Chen, CY., Wu, LC., Chen, HY. *Inactivación de Staphylococcus aureus y Escherichia coli en agua mediante fotocatalisis con TiO₂ fijo*. Agua, aire, suelo, Pollut 212, 231–238 (2010). <https://doi.org/10.1007/s11270-010-0335-y>
29. Cheng, Mi Kang, Zhi-peng Shen, Lei Shi, Xiang Zheng, *Visible-light-driven photocatalytic inactivation of bacteriophage f2 by Cu- TiO₂ nanofibers in the presence of humic acid*, Journal of Environmental Sciences, Volume 77, 2019, Pages 383-391, ISSN 1001-0742, <https://doi.org/10.1016/j.jes.2018.09.017> (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1001074218317091>)
30. Chiriboga Sisalema, Indira Jackeline. (2019). Bacterias resistentes a antibióticos en estaciones depuradoras de agua residual. (Máster universitario en hidrología y gestión de recursos hídricos, Universidad de Alcalá, España). https://ebuah.uah.es/dspace/bitstream/handle/10017/41790/TFM_Chiriboga_Sisalema_2019.pdf?sequence=1&isAllowed=y
31. Chorus, I., & Welker, M. (2021, 8 marzo). Toxic Cyanobacteria in Water | A Guide to Their Public Health Consequence. Taylor & Francis Group. Recuperado 6 de septiembre de 2021, de <https://www.taylorfrancis.com/books/oa-edit/10.1201/9781003081449/toxic-cyanobacteria-water-ingrid-chorus-martin-welker>

32. CIDTA, Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico del Agua. (2021). *Desinfección*. CIDTA Universidad de Salamanca. Recuperado 15 de mayo de 2021, de <https://cidta.usal.es/cursos/etap/modulos/libros/DESINFECCION.pdf>

33. CNDH. (2014, diciembre). El derecho humano al agua potable y saneamiento. Comisión Nacional de Derechos Humanos. Recuperado 5 de septiembre de 2021, de <http://appweb.cndh.org.mx/DerechoAgua/archivos/contenido/CPEUM/H1.pdf>

34. Cochrane. (2021). PRISMA diagrams. Cochrane Common Mental Disorders. Recuperado 24 de septiembre de 2021, de <https://cmd.cochrane.org/prisma-diagrams>

35. COF Zaragoza. (2018). *El bismuto en medicina*. BIFAR132. FlippingBook. Recuperado 21 de octubre de 2021, de <https://cofzaragoza.org/Revistas/BIFAR/BIFAR132/35/>

36. CONAGUA Libro 23 (2019a). *Desinfección para sistemas de agua potable y saneamiento*. Manual de agua potable alcantarillado y saneamiento. <https://files.conagua.gob.mx/conagua/mapas/SGAPDS-1-15-Libro23.pdf>

37. CONAGUA Libro 25 (2019b). *Introducción al tratamiento de aguas residuales municipales*. Manual de agua potable alcantarillado y saneamiento. <https://files.conagua.gob.mx/conagua/mapas/SGAPDS-1-15-Libro25.pdf>

38. CONAGUA. (2018). *Atlas del agua en México*. Comisión nacional del agua, Secretaría del medio ambiente. http://sina.conagua.gob.mx/publicaciones/AAM_2018.pdf

39. Cooper, A.T.; Goswami, D.Y.; Block, S.S. *Simultaneous detoxification and disinfection of water by solar photocatalytic treatment*. Int. Sol. Energy Conf. 1997, 277–282

40. Davies, R.L., & Etris, S.F. (1997). The development and functions of silver in water purification and disease control. *Catalysis Today*, 36, 107-114. <https://www.semanticscholar.org/paper/The-development-and-functions-of-silver-in-water-Davies-Etris/43d8e982cd934c63d2727daac75eed7e275d1b99>

41. De La Cruz, Alexis y Murcia, Daniel. *Eliminación de E. coli y Pseudomona aeruginosa de agua potable usando un sistema de desinfección con luz ultravioleta y dióxido de titanio*. Revista científica universitaria Centros, 15 de junio de 2018 – Vol. 8 No. 1 ISSN: 2304-604X pp 87-100. <http://portal.amelica.org/ameli/jatsRepo/228/2281003006/html/index.html>

42. De la Macorra García, C., Brizard, A., Rincón Arévalo, P., & Nieves Sánchez, R. (2004). TECNOLOGÍA y DESARROLLO. *Estudio cinético de la descomposición del peróxido de hidrógeno en condiciones de extrema alcalinidad.*, II, 1–16. https://revistas.uax.es/index.php/tec_des/article/view/511
43. Diptipriya Sethi, Naresh Jada, Ashish Tiwari, Sakthivel Ramasamy, Tapan Dash, Sony Pandey, *Photocatalytic destruction of Escherichia coli in water by V2O5/TiO₂*, Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology, Volume 144, 2015, Pages 68-74, ISSN 1011-1344, <https://doi.org/10.1016/j.jphotobiol.2015.02.003>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1011134415000378>)
44. DOF - Diario Oficial de la Federación. (2018, 5 junio). Estrategia Nacional de Acción contra la Resistencia a los Antimicrobianos. Recuperado 21 de abril de 2021, de http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5525043&fecha=05/06/2018
45. Doménech, J. (2004, 1 mayo). *Ozono frente a cloro* | Offarm. Elsevier.es. <https://www.elsevier.es/es-revista-offarm-4-articulo-ozono-frente-cloro-13061803>
46. Dong, H.; Zeng, G.; Tang, L.; Fan, C.; Zhang, C.; He, X.; He, Y. *An overview on limitations of TiO₂-based particles for photo-catalytic degradation of organic pollutants and the corresponding countermeasures*. Water Res. 2015, 79, 128–146, <https://doi:10.1016/j.watres.2015.04.038>
47. Durich, O. J. (2000, 1 julio). *Enfermedades emergentes y reemergentes: algunas causas y ejemplos* | Medicina Integral. Elsevier - Medicina integral. Recuperado 26 de abril de 2021, de <https://www.elsevier.es/es-revista-medicina-integral-63-articulo-enfermedades-emergentes-reemergentes-algunas-causas-15322>
48. Echeverry-Chica, Julián y Naranjo-Díaz, Andrea y Araque-Marín, Pedronel. (2020). *Nanopartículas de plata funcionalizadas in situ con D-limoneno: efecto en la actividad antibacteriana*. Revista ION. 33. 79-92. 10.18273/revion.v33n1-2020008 http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S0120-00X2020000100079&script=sci_abstract&tlng=es
49. Egoburo, Diego Ezequiel; Pettinari, María Julia; Piuri, Mariana; *Reguladores globales en Escherichia coli: su efecto en el metabolismo central y en la síntesis de compuestos de interés biotecnológico*; 18-2-2019. Universidad de Buenos Aires, Argentina. Tesis doctoral. <https://ri.conicet.gov.ar/handle/11336/80068>
50. Escuadra, S., Gómez, J., Altabás, L., Lasheras, A. M., Bezdicek, J., & Ormad, M. P. (2015, 29 julio). *Aplicación de nano-fotocatálisis con TiO₂ como tratamiento final de agua de salida de depuradora*. Aguas residuales info.

<https://www.aguasresiduales.info/revista/articulos/aplicacion-de-nano-fotocatalisis-con-tio2-como-tratamiento-final-de-agua-de-salida-de-depuradora>

51. Espinosa-García, Ana Cecilia, Arias-Ortíz, Carlos F., y Mazari-Hiriart, Marisa. (2004). *Virus en sistemas acuáticos e implicaciones en salud pública. Hidrobiológica*, 14(2), 166-178. Recuperado en 23 de abril de 2021, de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttextpid=S0188-88972004000200011ylng=esytlng=es
52. Eunhoo Jeong, Hyeon Yeong Park, Jiho Lee, Hyung-Eun Kim, Changha Lee, Eun-Ju Kim, Seok Won Hong, *Long-term and stable antimicrobial properties of immobilized Ni/TiO₂ nanocomposites against Escherichia coli, Legionella thermalis, and MS2 bacteriophage*, Environmental Research, Volume 194, 2021, 110657, ISSN 0013-9351, <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.110657> (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0013935120315541>)
53. Evlampidou, Iro et. Al. *Trihalomethanes in Drinking Water and Bladder Cancer Burden in the European Union*. Environmental Health perspectives EHP vol 128, No 1 <https://ehp.niehs.nih.gov/doi/10.1289/EHP4495>
54. FAO, (2018). *Evaluación de la exposición a peligros microbiológicos en los alimentos: Directrices*. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO). Recuperado 6 de septiembre de 2021, de <http://www.fao.org/fileadmin/templates/agns/pdf/jemra/a0251s.pdf>
55. Fernández, A. M. C., Moreno, I., Jos, A., Repetto, G., Pichardo, S., & Prieto, A. (2005a). *Cianobacterias y cianotoxinas: necesidad de su control en el agua de consumo humano* | Cameán Fernández | Revista de Salud Ambiental. Diffundit. Recuperado 20 de octubre de 2021, de <https://ojs.diffundit.com/index.php/rsa/article/view/309/268>
56. Fernández Ibáñez, P. (2005b). *Desinfección con reactores solares: experiencia operativa (Vol. 16)*. CIEMAT - PSA. https://www.psa.es/es/projects/solarsafewater/documents/libro/16_Capitulo_16.pdf
57. Gallo, G. (2017, 26 junio). *Bacterias. . . la otra historia*. INECOL- CONACYT. <http://www.inecol.mx/inecol/index.php/es/2017-06-26-16-35-48/17-ciencia-hoy/479-bacterias-la-otra-historia#:~:text=Las%20bacterias%20ben%C3%A9ficas%20son%20principalmente,desarrollo%20de%20bacterias%20pat%C3%B3genas%20como>
58. Gobierno de México. (2019). *20 Principales causas de enfermedad nacional*. Anuario de morbilidad 1984 - 2019. (N.o 2019). Secretaría de Salud. https://epidemiologia.salud.gob.mx/anuario/html/principales_nacional.html

59. Gobierno USA. (2010, 18 octubre). *Acerca de los parásitos. Centros para el control y prevención de enfermedades.* <https://www.cdc.gov/parasites/es/about.html#:~:text=Los%20helminths%20son%20organismos%20grandes,multiplicarse%20en%20los%20seres%20humanos>
60. Gosgot, Wildor Angeles. *Eficiencia del catalizador de concetro con TiO₂ en fotorreactor para desinfección de agua y degradación de materia orgánica del agua residual de la ciudad de Chachapoyas, amazonas.* 2018. Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas. Tesis de grado. <http://repositorio.untrm.edu.pe/bitstream/handle/UNTRM/1507/Gosgot%20Angeles%20Wildor.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
61. Graham, Ph.D., B. J. (2020). Virus | NHGRI. National Human Genome Research Institute. <https://www.genome.gov/es/genetics-glossary/Virus#:~:text=Necesitan%20infectar%20c%3%A9lulas%20y%20usar,en%20el%20proceso%20de%20multiplicaci%C3%B3n>
62. Gutiérrez, Rico. *Desinfección foto-catalítica del agua para consumo humano usando luz solar y dióxido de titanio (TiO₂) inmovilizado.* Colecciones de Tesis en el repositorio institucional de la Universidad Autónoma de Querétaro. Junio 2008. <http://ri-ng.uaq.mx/handle/123456789/673>
63. Hemraj M. Yadav, Sachin V. Otari, Raghvendra A. Bohara, Sawanta S. Mali, Shivaji H. Pawar, Sagar D. Delekar, Synthesis and visible light photocatalytic antibacterial activity of nickel-doped TiO₂ nanoparticles against Gram-positive and Gram-negative bacteria, *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, Volume 294, 2014, Pages 130-136, ISSN 1010-6030, <https://doi.org/10.1016/j.jphotochem.2014.07.024>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1010603014003359>)
64. Herrero Jaén, S. (2016, 28 julio). *Formalización del concepto de salud a través de la lógica: impacto del lenguaje formal en las ciencias de la salud.* Herrero Jaén | Revista Ene de Enfermería. ENE Revista de enfermería. <http://www.ene-enfermeria.org/ojs/index.php/ENE/article/view/630>
65. Higuera Cobos, O. F., & Tristancho Reyes, J. L. (2006). *Estudio electroquímico de la reducción del peróxido de hidrógeno sobre aleaciones utilizadas en la industria joyera.* *Scientia et Technica*, Año XII(No 30), 349–354. <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/4832447.pdf>
66. Infosalus. (2018, 23 enero). *Vivimos rodeados de microorganismos: ¿Cómo velan por nuestra salud?* infosalus.com. Recuperado 25 de octubre de 2021, de <https://www.infosalus.com/salud-investigacion/noticia-vivimos-rodeados-microorganismos-velan-salud-20180123065933.html>

67. Jeong, Hyeon Yeong Park, Jiho Lee, Hyung-Eun Kim, Changha Lee, Eun-Ju Kim, Seok Won Hong, Long-term and stable antimicrobial properties of immobilized Ni/TiO₂ nanocomposites against *Escherichia coli*, *Legionella thermalis*, and MS2 bacteriophage, *Environmental Research*, Volume 194, 2021, 110657, ISSN 0013-9351, <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.110657>
68. Jiménez, B., Maya, C., & Galván, M. (2007, 1 septiembre). Helminth ova control in wastewater and sludge for advanced and conventional sanitation | *Water Science & Technology* | IWA Publishing. IWA Publishing. Recuperado 21 de octubre de 2021, de <https://iwaponline.com/wst/article-abstract/56/5/43/14049/Helminth-ova-control-in-wastewater-and-sludge-for?redirectedFrom=fulltext>
69. Joost, Katre Juganson, Meeri Visnapuu, Monika Mortimer, Anne Kahru, Ergo Nõmmiste, Urmeli Joost, Vambola Kisand, Angela Ivask, *Photocatalytic antibacterial activity of nano- TiO₂ (anatase)-based thin films: Effects on Escherichia coli cells and fatty acids*, *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, Volume 142, 2015, Pages 178-185, ISSN 1011-1344, <https://doi.org/10.1016/j.jphotobiol.2014.12.010> (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S101113441400373X>)
70. Juárez, M.M; Poma, H.R; Rajal, V.B.¿Cumplir con la legislación nos garantiza consumir agua segura?, *RIBAGUA - Revista Iberoamericana del Agua*, Volume 2, Issue 2, 2015, Pages 71-79, ISSN 2386-3781, <https://doi.org/10.1016/j.riba.2015.10.002>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2386378115000092>)
71. Juhua He, Ashutosh Kumar, Musharib Khan, Irene M.C. Lo, (2021), Critical review of photocatalytic disinfection of bacteria: from noble metals- and carbon nanomaterials- TiO₂ composites to challenges of water characteristics and strategic solutions, *Science of The Total Environment*, Volume 758, 2021, 143953, ISSN 0048-9697, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143953>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969720374842>)
72. Kershenobich, D. & Unidad de Medicina Experimental. (2007, octubre). Facultad de Medicina UNAM. Facultad de Medicina - UNAM. Recuperado 26 de abril de 2021, de http://www.facmed.unam.mx/eventos/seam2k1/2007/oct_01_ponencia.html
73. Khedr TM, El-Sheikh SM, Ismail AA, Kowalska E, Bahnemann DW. *Fotodegradación de microcistina-LR usando fotocatalizador de TiO₂ mesoporoso co-modificado con C / N activado por luz visible* *Materiales* . 2019; 12 (7): 1027. <https://doi.org/10.3390/ma12071027>
74. Kikuchi, Y.; Sunada, K.; Iyoda, T.; Hashimoto, K.; Fujishima, A. *Photocatalytic bactericidal effect of TiO₂ thin films: Dynamic view of the active oxygen species*

responsible for the effect. J. Photochem. Photobiol. A 1997, 106, 51–56,
doi:10.1016/S1010-6030(97)00038-5
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1010603097000385>

75. Kim, Kashif Ghafoor, Jooyoung Lee, Mei Feng, Jungyeon Hong, Dong-Un Lee, Jiyong Park, *Bacterial inactivation in water, DNA strand breaking, and membrane damage induced by ultraviolet-assisted titanium dioxide photocatalysis*, Water Research, Volume 47, Issue 13, 2013, Pages 4403-4411, ISSN 0043-1354, <https://doi.org/10.1016/j.watres.2013.05.009>.
(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S004313541300417X>)
76. Khokhar, T., & Kashiwase, H. (2015, 11 agosto). La población mundial en el futuro en cuatro gráficos. Blogs del Banco Mundial. Recuperado 21 de octubre de 2021, de <https://blogs.worldbank.org/es/opendata/la-poblacion-mundial-en-el-futuro-en-cuatro-graficos>
77. Kowal, Wysocka Król, Kopaczyńska, E. Dworniczek, R. Franiczek, M. Wawrzyńska, M. Vargová, M. Zahoran, E. Rakovský, P. Kuš, G. Plesch, A. Plecenik, F. Laffir, S. A. Tofail, H. P. odbielska. *Fotoexcitación in situ de nanopólvos de titania dopados con plata para actividad contra bacterias y levaduras.* J. Colloid Interface Sci., 362 (2011), págs. 50 - 57. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0021979711007521>
78. Kowalska, Z. Wei, B. Karabiyik, A. Herissan, M. Janczarek, M. Endo, A. Markowska-Szczupak, H. Remita, B. Ohtani, *Silver-modified titania with enhanced photocatalytic and antimicrobial properties under UV and visible light irradiation*, Catalysis Today, Volume 252, 2015, Pages 136-142, ISSN 0920-5861, <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2014.10.038>.
(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0920586114007263>)
79. Kuri-Morales PA, Guzmán-Morales E, De La Paz-Nicolau E, et al.,. *Enfermedades emergentes y reemergentes.* Gac Med Mex. 2015;151(5):674-680.
<https://www.medigraphic.com/cgi-bin/new/resumen.cgi?IDARTICULO=61984>
80. Lanao, M.P. Ormad, P. Goñi, N. Miguel, R. Mosteo, J.L. Ovelleiro, *Inactivation of Clostridium perfringens spores and vegetative cells by photolysis and TiO₂ photocatalysis with H₂O₂*, Solar Energy, Volume 84, Issue 4, 2010, Pages 703-709, ISSN 0038-092X, <https://doi.org/10.1016/j.solener.2010.01.023>.
(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X10000368>)
81. Lanao, M.P. Ormad, R. Mosteo, J.L. Ovelleiro, *Inactivation of Enterococcus sp. by photolysis and TiO₂ photocatalysis with H₂O₂ in natural water*, Solar Energy, Volume 86, Issue 1, 2012, Pages 619-625, ISSN 0038-092X, <https://doi.org/10.1016/j.solener.2011.11.007>.
(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X11004178>)

82. Landmann, M, Rauls, E y Schmidt, WG. *The electronic structure and optical response of rutile, anatase and brookite TiO₂*. Journal of physics: condensed matter, volumen 24, No. 19. 21 de marzo 2012 doi:10.1088/0953-8984/24/19/195503 <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0953-8984/24/19/195503>
83. Laxma Reddy, P.V.; Kavitha, B.; Kumar Reddy, P.A.; Kim, K.H. *TiO₂-based photocatalytic disinfection of microbes in aqueous media: A review*. Environ. Res. 2017, 154, 296–303, doi:10.1016/j.envres.2017.01.018 <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0013935116311756>
84. Lee J. y Ko, G. *Norovirus and MS2 inactivation kinetics of UV-A and UV-B with and without TiO₂*, Water Research, Volume 47, Issue 15, 2013, Pages 5607-5613, ISSN 0043-1354, <https://doi.org/10.1016/j.watres.2013.06.035>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0043135413005265>)
85. Lenntech. (1998). *Estaño (Sn) Propiedades químicas y efectos sobre la salud y el medio ambiente*. Lenntech.es. Recuperado 11 de junio de 2021, de <https://www.lenntech.es/periodica/elementos/sn.htm>
86. Lenntech. (2021a). *Factores que influyen en la desinfección*. Recuperado 10 de mayo de 2021, de <https://www.lenntech.es/procesos/desinfeccion/factores/factores-desinfeccion-agua.htm>
87. Lenntech. (2021b). *waterborne diseases contagion*. Lenntech water treatment. Recuperado 5 de septiembre de 2021, de [https://www.lenntech.es/procesos/desinfeccion/deseases/enfermedades-transmitidas-por-el-agua.htm#:~:text=fermedades%20como%20fiebre%20tifoidea%2C%20c%20c%20B3lera,la%20diarrea%20\(figura%201\)](https://www.lenntech.es/procesos/desinfeccion/deseases/enfermedades-transmitidas-por-el-agua.htm#:~:text=fermedades%20como%20fiebre%20tifoidea%2C%20c%20c%20B3lera,la%20diarrea%20(figura%201))
88. Lerma, M., y Farga, A. Servicio de Microbiología. Hospital Clínico Universitario de Valencia, (2018). *Enterovirus: Características y diagnóstico*. <https://seimc.org/contenidos/ccs/revisionestematicas/viromicromol/enterovi.pdf>
89. Lydakis-Simantiris, Despina Riga, Eleftheria Katsivela, Dionissios Mantzavinos, Nikolaos P. Xekoukoulotakis, *Disinfection of spring water and secondary treated municipal wastewater by TiO₂ photocatalysis*, Desalination, Volume 250, Issue 1, 2010, Pages 351-355, ISSN 0011-9164, <https://doi.org/10.1016/j.desal.2009.09.055> (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S001191640901087X>)
90. Liga, Erika L. Bryant, Vicki L. Colvin, Qilin Li, *Virus inactivation by silver doped titanium dioxide nanoparticles for drinking water treatment*, Water Research, Volume 45, Issue 2, 2011, Pages 535-544, ISSN 0043-1354,

<https://doi.org/10.1016/j.watres.2010.09.012>.
(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0043135410006470>)

91. Liu, Jie Ming, Aditya Sharma, Xiang Sun, Naoki Kawazoe, Guoping Chen, Yingnan Yang, *Sustainable photocatalytic disinfection of four representative pathogenic bacteria isolated from real water environment by immobilized TiO₂-based composite and its mechanism*, Chemical Engineering Journal, 2021, 131217, ISSN 1385-8947, <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.131217>.
(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1385894721027984>)
92. Liu, Wu, Yeh, Lee, Hung, " *Síntesis y capacidad bactericida de TiO₂ y Ag-TiO₂ preparado por método de coprecipitación* ", Revista internacional de fotoenergía, vol. 2012, artículo ID 640487, 7 páginas, 2012. <https://doi.org/10.1155/2012/640487>
93. Pinho Livia, Joana Azevedo, Ângela Brito, Arlete Santos, Paula Tamagnini, Vítor J.P. Vilar, Vítor M. Vasconcelos, Rui A.R. Boaventura, *Effect of TiO₂ photocatalysis on the destruction of Microcystis aeruginosa cells and degradation of cyanotoxins microcystin-LR and cylindrospermopsin*, Chemical Engineering Journal, Volume 268, 2015, Pages 144-152, ISSN 1385-8947, <https://doi.org/10.1016/j.cej.2014.12.111>.
(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1385894715000194>)
94. Lysaght, P. (2016, 29 noviembre). 5 realidades sobre el agua y el cambio climático. UNICEF Connect. <https://blogs.unicef.org/es/blog/5-realidades-sobre-el-cambio-climatico/>
95. Mac Mahon, Suresh C. Pillai, John M. Kelly, Laurence W. Gill, *Solar photocatalytic disinfection of E. coli and bacteriophages MS2, ΦX174 and PR772 using TiO₂, ZnO and ruthenium based complexes in a continuous flow system*, Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology, Volume 170, 2017, Pages 79-90, ISSN 1011-1344, <https://doi.org/10.1016/j.jphotobiol.2017.03.027>.
(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1011134416310934>)
96. Magaña López, R., 2018. *Efecto de la plata, cobre, hierro y agregados minerales sobre huevos de helminto y su potencial uso en un sistema de filtración*. Doctorado. Universidad Nacional Autónoma de México. https://repositorio.unam.mx/contenidos/efecto-de-la-plata-cobre-hierro-y-agregados-minerales-sobre-huevos-de-helminto-y-su-potencial-uso-en-un-sistema-de-filtra-88574?c=rYo0GByd=falseyq=:*:yi=2yv=0yt=search_0yas=0
97. Magaña-López, R., Zaragoza-Sánchez, P., Chávez-Mejía, A., & Jiménez-cisneros, B. (2021, 11 junio). *The Use of TiO₂ as a Disinfectant in Water Sanitation Applications*. MDPI. <https://www.mdpi.com/2073-4441/13/12/1641>

98. Mahmoudian-Boroujerd, Ayoub Karimi-Jashni, Seyed Nezamedin Hosseini, Mahdi Paryan, *Optimization of rDNA degradation in recombinant Hepatitis B vaccine production plant wastewater using visible light excited Ag-doped TiO₂ nanophotocatalyst*, Process Safety and Environmental Protection, Volume 122, 2019, Pages 328-338, ISSN 0957-5820, <https://doi.org/10.1016/j.psep.2018.11.027>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0957582018310024>)
99. Majeda Khraisheh, Lijun Wu, Ala'a H. Al-Muhtaseb, Mohammad A. Al-Ghouti, *Photocatalytic disinfection of Escherichia coli using TiO₂ P25 and Cu-doped TiO₂*, Journal of Industrial and Engineering Chemistry, Volume 28, 2015, Pages 369-376, ISSN 1226-086X, <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2015.02.023>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1226086X15000891>)
100. Makropoulou, Paraskevi Panagiotopoulou and Danae Venieri. *N-doped TiO₂ photocatalysts for bacterial inactivation in water*, Journal of Chemical Technology and Biotechnology, September 1, 2018. DOI 10.1002/jctb.5639 <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/jctb.5639>
101. Malato, S. Blanco, D. Alarcón, M. Maldonado y P. Fernández, (2007), *Photo-catalytic decontamination and disinfection of wáter with solar collectors*, Catalysis Today, vol. 122, 2007, pp. 137–149. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0920586107000478>
102. Malato, S., Marotta, Fernandez-Ibañez y Di Somma, *Solar photocatalysis: Materials, reactors, some commercial, and pre-industrialized applications. A comprehensive approach*, Applied Catalysis B: Environmental, Volumes 170–171, 2015, Pages 90-123, ISSN 0926-3373, <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2014.12.050>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926337315000028>)
103. Maldonado M, Suárez S y Miranda N. (2015) *Degradación de contaminantes emergentes mediante TiO₂ inmovilizado e irradiación solar*. CIEMAT/ PSA. Colombia https://www.psa.es/en/areas/tsa/docs/Tesis_Noelia_Miranda.pdf
104. Mangayayam, John Kiwi, Stefanos Giannakis, Cesar Pulgarin, Ivica Zivkovic, Arnaud Magrez, Sami Rtimi, *FeOx magnetization enhancing E. coli inactivation by orders of magnitude on Ag- TiO₂ nanotubes under sunlight*, Applied Catalysis B: Environmental, Volume 202, 2017, Pages 438-445, ISSN 0926-3373, <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2016.09.064>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926337316307524>)
105. Márquez, L. (2016, 11 enero). [PDF] DESINFECCIÓN SOLAR. Lydia G. Márquez-Bravo Instituto Mexicano de Tecnología del Agua Paseo Cuauhnáhuac 8532, Jiutepec, Mor. - Free Download PDF. Silo.Tips, Documentos de Investigación. Recuperado 9 de mayo de 2021, de

<https://silo.tips/download/desinfeccion-solar-lydia-g-marquez-bravo-instituto-mexicano-de-tecnologia-del-ag>

106. Matsunaga, T. *Esterilización con fotosemiconductores particulados*. J. Antibact. Antifung. Agentes. 1985 , 13 , 211-220
107. Misstear, Laurence W. Gill, *The inactivation of phages MS2, Φ X174 and PR772 using UV and solar photocatalysis*, Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology, Volume 107, 2012, Pages 1-8, ISSN 1011-1344, <https://doi.org/10.1016/j.jphotobiol.2011.10.012>
(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1011134411002429>)
108. Miyauchi, M.; Sunada, K.; Hashimoto, K. Antiviral effect of visible light-sensitive CuxO/TiO₂ photocatalyst. *Catalysts* 2020, 10, 1093, doi:10.3390/catal10091093
https://www.researchgate.net/publication/345334323_Antiviral_Effect_of_Visible_Light-Sensitive_CuxOTiO2_Photocatalyst
109. Monge, Sarai; Torres Pinto, André; Ribeiro, Rui y Silva, Adrián y Bengoa, Christophe. (2018). *Manual Técnico sobre Procesos de Oxidación Avanzada aplicados al Tratamiento de Aguas Residuales Industriales*. http://www.cyted.org/sites/default/files/manual_sobre_oxidaciones_avanzadas_0.pdf
110. Monteagudo, Antonio Durán, Israel San Martín, Alba María Acevedo. *A novel combined solar pasteurizer/ TiO₂ continuous-flow reactor for decontamination and disinfection of drinking water*, *Chemosphere*, Volume 168, 2017, Pages 1447-1456, ISSN 0045-6535, <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.11.142>.
(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0045653516316885>)
111. Moreno M, Claudia, González E, Rubén, y Beltrán, Constanza. (2009). *Mecanismos de resistencia antimicrobiana en patógenos respiratorios*. *Revista de otorrinolaringología y cirugía de cabeza y cuello*, 69(2), 185-192. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-48162009000200014>
112. Moreno, Andrea L, Castro, Camilo A, Centeno, Aristóbulo, y Giraldo, Sonia A. (2011). *Cinética de la Desinfección Fotocatalítica de Agua contaminada con E. coli: Efecto de la Concentración del Fotocatalizador y la Potencia de Irradiación*. *Información tecnológica*, 22(3), 69-78. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642011000300009>
113. Mosquito, Susan, y Ruiz, Joaquim, y Bauer, José Luis, y Ochoa, Theresa J. (2011). *Mecanismos moleculares de resistencia antibiótica en Escherichia coli asociadas a diarrea*. *Revista Peruana de Medicina Experimental y Salud Pública*,

28(4),648-656.[fecha de Consulta 13 de Abril de 2021]. ISSN: 1726-4642.
Disponibile en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=36322411013>

114. Muñoz, F. A., Moreno - Rojas, R., Moreno Ortega, A., Muñoz Cañete, J. E., & Gómez Díaz, R. (2016, 8 septiembre). *Nulo efecto bactericida de la radiación ultravioleta emitida por diodos LED*. | Journal of Negative and No Positive Results. Journal of Negative and No Positive Results. <https://revistas.proeditio.com/jonnpr/article/view/1083/0>
115. Murcia, E.G. Ávila-Martínez, H. Rojas, J.A. Navío, M.C. Hidalgo, *Study of the E. coli elimination from urban wastewater over photocatalysts based on metallized TiO₂*, Applied Catalysis B: Environmental, Volume 200, 2017, Pages 469-476, ISSN 0926-3373, <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2016.07.045>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926337316305872>)
116. Murray, P. (2018, 15 febrero). Microbiología médica básica - 1st Edition. Elsevier. Recuperado 6 de septiembre de 2021, de <https://www.elsevier.com/books/microbiologia-medica-basica/murray/978-84-9113-274-5>
117. Najarro Medina, Jelyka Liliana. *Evaluación de los fotocatalizadores H₂O₂ y TiO₂ para el tratamiento de aguas residuales*, Chuquitanta, 2018. Universidad César Vallejo, Facultad de ingeniería, Lima, Perú, tesis de grado. <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/27211>
118. Navarro, I. M. M., Universidad de Sevilla, Facultad de farmacia, & Departamento de bioquímica, bromatología y toxicología, Tesis de grado. (2002, 8 mayo). Microcistinas: presencia, determinación y estudios toxicológicos. idUS-Depósito de investigación Universidad de Sevilla. Recuperado 6 de septiembre de 2021, de <https://idus.us.es/handle/11441/72519>
119. Nevárez - Martínez, María C. et al. *Fotocatálisis: inicio, actualidad y perspectivas a través del TiO₂*. Avances en Química, [S.l.], v. 12, n. 2 - 3, p. 45-59, ene. 2018. ISSN 1856-5301. Disponible en: <http://erevistas.saber.ula.ve/index.php/avancesenquimica/article/view/10120/10058>
120. OMS. (2018, 25 abril). *Guías para la calidad del agua de consumo humano: cuarta edición que incorpora la primera adenda*. <Http://Apps.Who.Int/Iris/Handle/10665/272403>. <http://apps.who.int/iris/handle/10665/272403>
121. OMS. (2020, 23 diciembre). *Cyanobacterial toxins: cylindrospermopsins*. IRIS - Repositorio Institucional Para Compartir Información. Recuperado 6 de septiembre de 2021, de http://apps.who.int/iris/handle/10665/338063?search-result=true&query=cyn&scope=&rpp=10&sort_by=score&order=desc

122. ONU. (2014, 24 noviembre). Agua y desarrollo sostenible | Decenio Internacional para la Acción «El agua, fuente de vida» 2005–2015. Decenio del agua. Agua y desarrollo sostenible. https://www.un.org/spanish/waterforlifedecade/water_and_sustainable_development.shtml#:~:text=El%20agua%20est%C3%A1%20en%20el,saludables%20y%20a%20supervivencia%20humana,ytext=El%20agua%20es%20un%20recurso,renovable%20si%20est%C3%A1%20bien%20gestionado
123. ONU. (2015). *Objetivos y metas de desarrollo sostenible*. Desarrollo Sostenible. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>
124. OPS. (2021). *ANEXO I: Glosario. Organización panamericana de la salud*. Recuperado 6 de septiembre de 2021, de https://www3.paho.org/hq/index.php?option=com_content&view=article&id=10810:2015-anexo-i-glosario&Itemid=41421&lang=es
125. Tsydenova O, Valeriy Batoev and Agniya Batoeva. Solar-Enhanced Advanced Oxidation Processes for Water, *Treatment: Simultaneous Removal of Pathogens and Chemical Pollutants*. Int. J. Environ. Res. Public Health 2015, 12, 9542-9561; doi:10.3390/ijerph120809542 <https://www.mdpi.com/1660-4601/12/8/9542>
126. Park, E. Kettleson, W.-J. An, YJ Tang, P. Biswas. *Inactivación de E. coli en agua mediante películas fotocatalíticas nanoestructuradas sintetizadas por rutas de aerosol*. Catalizadores , 3 (2013) , págs. 247 - 260. <https://www.mdpi.com/2073-4344/3/1/247/htm>
127. Pestana, Christine Edwards, Radhakrishna Prabhu, Peter K.J. Robertson, Linda A. Lawton, *Photocatalytic degradation of eleven microcystin variants and nodularin by TiO₂ coated glass microspheres*, Journal of Hazardous Materials, Volume 300, 2015, Pages 347-353, ISSN 0304-3894, <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2015.07.016>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304389415005452>)
128. Pestana, Peter Hobson, Peter K.J. Robertson, Linda A. Lawton, Gayle Newcombe, Removal of microcystins from a waste stabilisation lagoon: *Evaluation of a packed-bed continuous flow TiO₂ reactor*, Chemosphere, Volume 245, 2020, 125575, ISSN 0045-6535, <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.125575>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0045653519328152>)
129. Pleskova, I.S. Golubeva, Y.K. Verevkin, *Bactericidal activity of titanium dioxide ultraviolet-induced films*, Materials Science and Engineering: C, Volume 59, 2016, Pages 807-817, ISSN 0928-4931, <https://doi.org/10.1016/j.msec.2015.10.021>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0928493115304537>)

130. Polo-López, MI, Fernández-Ibáñez, P., García-Fernández, I., Oller, I., Salgado-Tránsito, I. y Sichel, C. (2010), Resistencia de las esporas de *Fusarium* sp a la fotocatalisis solar de TiO_2 : influencia del tipo de esporas y el agua (resultados de escalado). *J. Chem. Technol. Biotechnol.*, 85: 1038-1048. <https://doi-org.pbidi.unam.mx:2443/10.1002/jctb.2397>
131. Popi Karaolia, Irene Michael-Kordatou, Evroula Hapeshi, Catherine Drosou, Yannis Bertakis, Dimitris Christofilos, Gerasimos S. Armatas, Labrini Sygellou, Thomas Schwartz, Nikolaos P. Xekoukoulotakis, Despo Fatta-Kassinou, Removal of antibiotics, antibiotic-resistant bacteria and their associated genes by graphene-based TiO_2 composite photocatalysts under solar radiation in urban wastewaters, *Applied Catalysis B: Environmental*, Volume 224, 2018, Pages 810-824, ISSN 0926-3373, <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2017.11.020> (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926337317310755>)
132. Quesada, Antonio & Carrasco, David & Cirés, Samuel. (2006). *Cianobacterias en agua de consumo y de recreo: un problema de todos*. Departamento de Biología, Universidad autónoma de Madrid. https://www.researchgate.net/publication/242293366_CIANOBACTERIAS_EN_AGUAS_DE_CONSUMO_Y_DE_RECREO_UN_PROBLEMA_DE_TODOS
133. Rahimi, R.; Zargari, S.; Yousefi, A.; Yaghoubi Berijani, M.; Ghaffarinejad, A.; Morsali, A. Visible light photocatalytic disinfection of *E. coli* with TiO_2 -graphene nanocomposite sensitized with tetrakis(4-carboxyphenyl)porphyrin. *Appl. Surf. Sci.* 2015, 355, 1098–1106, Doi:10.1016/j.apsusc.2015.07.115 https://www.researchgate.net/publication/280230435_Visible_light_photocatalytic_disinfection_of_E_Coli_with_TiO2-graphene_nanocomposite_sensitized_with_tetrakis4-carboxyphenylporphyrin
134. Ríos-Tobón, Sandra y Agudelo-Cadavid, Ruth y Gutierrez, Lina. (2017). *Patógenos e indicadores microbiológicos de calidad del agua para consumo humano*. *Revista Facultad Nacional de Salud Pública*. 35. 236-247. DOI:10.17533/udea.rfnsp.v35n2a08 https://www.researchgate.net/publication/318842980_Patogenos_e_indicadores_microbiologicos_de_calidad_del_agua_para_consumo_humano
135. Riverón Corteguera, Raúl L. (2002). Enfermedades emergentes y reemergentes: un reto al siglo XXI. *Revista Cubana de Pediatría*, 74(1), 7-22. Recuperado en 21 de octubre de 2021, de http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0034-75312002000100002&lng=es&tlng=es
136. Rizzo, A. Della Sala, A. Fiorentino, G. Li Puma, *Disinfection of urban wastewater by solar driven and UV lamp – TiO_2 photocatalysis*: Effect on a multi

- drug resistant *Escherichia coli* strain, *Water Research*, Volume 53, 2014, Pages 145-152, ISSN 0043-1354, <https://doi.org/10.1016/j.watres.2014.01.020>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0043135414000529>)
137. Rodríguez Méndez, Álvaro Gaspar. *Síntesis y caracterización de nanopartículas de TiO₂ dopadas con plata para desinfección de aguas residuales*. 2016. Síntesis y caracterización de nanopartículas de tio₂ dopadas con plata para desinfección de aguas residuales. Tesis de licenciatura. <http://ri.uaq.mx/bitstream/123456789/4704/1/RI003351.pdf>
138. Rodríguez-Chueca, J., Ormad, MP, Mosteo, R., Canalis, S. y Ovelleiro, JL (2016), *Inactivación de Escherichia coli en agua dulce mediante fotocatalisis con TiO₂ -Efecto del H₂O₂ sobre la cinética de desinfección*. *Agua limpia del aire del suelo*, 44: 515-524. <https://doi-org.pbidi.unam.mx:2443/10.1002/clen.201500083>. <https://onlinelibrary-wiley-com.pbidi.unam.mx:2443/doi/abs/10.1002/clen.201500083>
139. Rojas – Higerá, et. al, (2010) Evaluación de tres métodos para la inactivación de coliformes y *Escherichia Coli* presentes en agua residual doméstica, empleada para riego. *Revista Universitas Scientiarum*, 2010, Vol 15 No. 2 páginas 139-149. Bogotá, 2010. <https://biblat.unam.mx/es/revista/universitas-scientiarum/articulo/evaluacion-de-tres-metodos-para-la-inactivacion-de-coliformes-y-escherichia-coli-presentes-en-agua-residual-domestica-empleada-para-riego>
140. Romero Reyes, J., López Valladares, L., y Olea Flores, C. H. (2016). *Efecto biocida del cobre frente a Escherichia coli y Staphylococcus aureus*. Universidad de Chile - Facultad de ciencias químicas y farmacéuticas. Recuperado 11 de junio de 2021, de <http://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/170431/Efecto-biocida-del-cobre-frente-a-escherichia-coli-y-staphylococcus-aureus.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
141. SSA. (2020, 15 enero). *Panorama Epidemiológico y Estadístico de la Mortalidad por Causas Sujetas a Vigilancia Epidemiológica en México*, 2017. *Panorama Epidemiológico y Estadístico de la Mortalidad por Causas Sujetas a Vigilancia Epidemiológica en México*, 2017. Secretaría de salud. <https://www.gob.mx/salud/documentos/panorama-epidemiologico-y-estadistico-de-la-mortalidad-por-causas-sujetas-a-vigilancia-epidemiologica-en-mexico-2017>
142. Sánchez, H. C. (2011). *Trihalometanos en aguas de consumo humano*. Redalyc.org. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=91922431001>
143. Sánchez-Fauquier, A., Roman, E., Colomina, J., y Wilhelmi, I. (2018). *Características clínicas y microbiológicas de las gastroenteritis por Astrovirus*. *Sociedad Española de Enfermedades Infecciosas y Microbiología Clínica*. <https://seimc.org/contenidos/ccs/revisionestematicas/viromicromol/Astrovirus.pdf>

144. Saran, Arunkumar, Devipriya. Desinfección del agua de lluvia recolectada en el techo para uso potable utilizando un reactor tubular de lecho fijo fotocatalítico solar a escala piloto. *Water Sci. Technol. Suministro de agua* , 18 (2017) , págs. 49 - 59. <https://iwaponline.com/ws/article/18/1/49/38208/Disinfection-of-roof-harvested-rainwater-for>
145. SDC de Bogotá, D. C. (2004). Guías para la prevención, control y vigilancia epidemiológica de infecciones intrahospitalarias. (Uso de desinfectantes ed., Vol. 7) [Libro electrónico]. Secretaría distrital de Salud Bogotá. <http://www.saludcapital.gov.co/sitios/VigilanciaSaludPublica/Todo%20IIH/007%20Desinfectantes.pdf>
146. SEMARNAT. (2018). *Informe de la situación del medio ambiente en México 2018*. Compendio de estadísticas ambientales, indicadores de desempeño ambiental y crecimiento verde. (No. 18). https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe18/tema/pdf/Cap6_Agua.pdf
147. Solsona, F., OPS/ CEPIS/ OMS, & Méndez, J. P. (2002). Desinfección del agua (2.a ed., Vol. 38) [Libro electrónico]. <https://iris.paho.org/bitstream/handle/10665.2/52807/DESINFECCIONAGUACEPI-S-spa.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
148. Huang S., Chih-Huang Weng, Jing-Hua Tzeng, Ya-Zhen Huang, Jin Anotai, Li-Ting Yen, Che-Jui Chang, Yao-Tung Lin, *Photocatalytic inactivation of Klebsiella pneumoniae by visible-light-responsive N/C-doped and N-tourmaline/palladium-C-codoped TiO₂*, *Chemical Engineering Journal*, Volume 379, 2020, 122345, ISSN 1385-8947, <https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.122345>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1385894719317486>)
149. Shim J., Young-Seok Seo, Byung-Taek Oh, Min Cho, *Microbial inactivation kinetics and mechanisms of carbon-doped TiO₂ (C- TiO₂) under visible light*, *Journal of Hazardous Materials*, Volume 306, 2016, Pages 133-139, ISSN 0304-3894, <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2015.12.013>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304389415302739>)
150. Skrabber, S. (2004, 1 junio). *Comparison of Coliforms and Coliphages as Tools for Assessment of Viral Contamination in River Water*. *Applied and Environmental Microbiology*. <https://aem.asm.org/content/70/6/3644.full>
151. Sostenibilidad semana. (2015, 8 septiembre). El crecimiento de la población mundial desde el año cero. <https://www.semana.com/impacto/articulo/crecimiento-poblacion-mundial-desde-ano-cero/33799/>

152. Spuhler, D., & Meierhofer, R. (2020). Desinfección solar (método SoDis). SSWM - Find tools for sustainable sanitation and water management! Recuperado 10 de mayo de 2021, de <https://sswm.info/es/gass-perspective-es/tecnologias-de/tecnologias-de-abastecimiento-de-agua/manejo-seguro-en-el-hogar/desinfecci%C3%B3n-solar-%28m%C3%A9todo-sodis%29#:~:text=El%20proceso%20conocido%20como%20desinfecci%C3%B3n,determinado%2C%20para%20destruir%20los%20pat%C3%B3genos>
153. Sreeja, S., y Vidya Shetty, K. (n.d.). *Microbial disinfection of water with endotoxin degradation by photocatalysis using Ag@ TiO₂ core shell nanoparticles*. Environmental Science and Pollution Research, 2016, 23(18), 18154–18164. <https://doi.org/pbidi.unam.mx:2443/10.1007/s11356-016-6841-8>. DOI 10.1007/s11356-016-6841-8
154. Suárez Larreinaga, Carmen Luisa, y Berdasquera Corcho, Denis. (2000). *Enfermedades emergentes y reemergentes: factores causales y vigilancia*. Revista Cubana de Medicina General Integral, 16(6), 593-597. Recuperado en 26 de abril de 2021, de http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0864-21252000000600011&lng=es&ty=es
155. Sun-Hyoung Kim, Hafiz Muhammad Shahbaz, Daseul Park, Soyoun Chun, Woosong Lee, Jong-Won Oh, Dong-Un Lee, Jiyong Park, *A combined treatment of UV-assisted TiO₂ photocatalysis and high hydrostatic pressure to inactivate internalized murine norovirus*, Innovative Food Science & Emerging Technologies, Volume 39, 2017, Pages 188-196, ISSN 1466-8564, <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2016.11.015>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1466856416307500>)
156. Sunnotel, R. Verdoold, PSM Dunlop, WJ Snelling, CJ Lowery, JSG Dooley, JE Moore, JA Byrne; *Inactivación fotocatalítica de Cryptosporidium parvum sobre películas de dióxido de titanio nanoestructuradas*. J Water Health 1 de marzo de 2010; 8 (1): 83–91. doi: <https://doi.org/10.2166/wh.2009.204>
157. Suri P., Hilary M. Thornton y M. Muruganandham (2012) Desinfección de agua utilizando fotocatalizadores de TiO₂ dopados con Pt y Ag , Environmental Technology, 33:14, 1651-1659, DOI: 10.1080 / 09593330.2011.641590 <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/09593330.2011.641590>
158. Schwegmann, H.; Ruppert, J.; Frimmel, F.H. *Influence of the pH-value on the photocatalytic disinfection of bacteria with TiO₂—Explanation by DLVO and XDLVO theory*. Water Res. 2013, 47, 1503–1511, doi:10.1016/j.watres.2012.11.030 <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0043135412008421>
159. Tallósy, S.P.; Janovák, L.; Ménesi, J.; Nagy, E.; Juhász, Á.; Balázs, L.; Deme, I.; Buzás, N.; Dékány, I. Investigation of the antibacterial effects of silver-modified TiO₂ and ZnO plasmonic photocatalysts embedded in polymer thin films.

Environ. Sci. Pollut. Res. Int. 2014, 21, 11155–11167, doi:10.1007/s11356-014-2568-6 <https://link.springer.com/article/10.1007/s11356-014-2568-6>

160. Téllez Acosta, A. J. (2012). Evaluación de la contaminación con criptosporidium. Evaluación de La Contaminación Con Cryptosporidium Spp En Los Suelos de Los Principales Parques Públicos y Zonas Verdes de La Ciudad de Tunja - Issuu. Recuperado 26 de julio de 2021, de https://issuu.com/medicinaveterinariajdc/docs/evaluacion_de_la_contaminacion
161. Theodora Fotiou, Theodoros Triantis, Triantafyllos Kaloudis, Anastasia Hiskia, *Photocatalytic degradation of cylindrospermopsin under UV-A, solar and visible light using TiO₂. Mineralization and intermediate products*, Chemosphere, Volume 119, Supplement, 2015, Pages S89-S94, ISSN 0045-6535, <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2014.04.045>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0045653514005311>)
162. Toribio, J., Gabriel, R., & Leyva, Y. (2016, septiembre). Detección de bacterias en el agua de lluvia y su resistencia a hipoclorito de sodio en tres Localidades del estado de Guerrero. - PDF Descargar libre. Tlamati Sabiduría. Recuperado 20 de octubre de 2021, de <https://docplayer.es/80707431-Deteccion-de-bacterias-en-el-agua-de-lluvia-y-su-resistencia-a-hipoclorito-de-sodio-en-tres-localidades-del-estado-de-guerrero.html>
163. Tzeng J., Chih-Huang Weng, Li-Ting Yen, Gulomjon Gaybullaev, Che-Jui Chang, Mark Daniel G. de Luna, Yao-Tung Lin, *Inactivation of pathogens by visible light photocatalysis with nitrogen-doped TiO₂ and tourmaline-nitrogen co-doped TiO₂*, Separation and Purification Technology, Volume 274, 2021, 118979, ISSN 1383-5866, <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2021.118979>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1383586621006894>)
164. Ulloa, Nancy, Gómez, Claudio y Muñoz, Patricio. *Antibiotic resistance in bacteria from seawater surrounding antarctic stations*. Anales Instituto Patagonia (Chile) vol.46 no.3 Punta Arenas Dec. 2018 <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-686X2018000300029>
165. UNESCO. *Antropoceno: la problemática vital de un debate científico*. (2018, 15 mayo). <https://es.unesco.org/courier/2018-2/antropoceno-problematica-vital-debate-cientifico>
166. Ungría Castillo, A. & Universidad de Zaragoza, Escuela de Ingeniería y Arquitectura. (2016, abril). *Regeneración de aguas depuradas mediante fotocatalisis heterogénea con dióxido de titanio: Análisis de variables influyentes*. Repositorio institucional de documentos - Trabajo de fin de grado Ingeniería Química. Recuperado 15 de junio de 2021, de <https://zaguan.unizar.es/record/57475/files/TAZ-TFG-2016-444.pdf>

167. USEPA. (1999, septiembre). Folleto informativo de tecnología de aguas residuales. Desinfección con luz ultravioleta. Recuperado 15 de octubre de 2021, de <https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-06/documents/cs-99-064.pdf>
168. USEPA. (2020, 21 octubre). La lista de la EPA de productos desinfectantes aprobados contra el SARS-CoV-2 supera los 500. Recuperado 15 de octubre de 2021, de <https://www.epa.gov/newsreleases/la-lista-de-la-epa-de-productos-desinfectantes-aprobados-contra-el-sars-cov-2-supera>
169. Valades, L. D. A. (2021, 21 febrero). *¿Qué factores influyen en la eficiencia de la desinfección del agua?* iAgua. Recuperado 10 de mayo de 2021, de <https://www.iagua.es/blogs/luis-anda-valades/que-factores-influyen-eficiencia-desinfeccion-agua-0>
170. Venieri, Antonia Fragedaki, Maria Kostadima, Efthalia Chatzisyneon, Vassilios Binas, Apostolos Zachopoulos, George Kiriakidis, Dionissios Mantzavinos, *Solar light and metal-doped TiO₂ to eliminate water-transmitted bacterial pathogens: Photocatalyst characterization and disinfection performance*, Applied Catalysis B: Environmental, Volumes 154–155, 2014, Pages 93-101, ISSN 0926-3373, <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2014.02.007>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926337314000988>)
171. Venieri, Iosifina Gounaki, Vassilios Binas, Apostolos Zachopoulos, *George Kiriakidis, Dionissios Mantzavinos, Inactivation of MS2 coliphage in sewage by solar photocatalysis using metal-doped TiO₂*, Applied Catalysis B: Environmental, Volume 178, 2015, Pages 54-64, ISSN 0926-3373, <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2014.10.052> (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926337314006729>)
172. Venieri, D., Tournas, F., Gounaki, I., Binas, V., Zachopoulos, A., Kiriakidis, G., & Mantzavinos, D. (2017). Inactivation of Staphylococcus aureus in water by means of solar photocatalysis using metal doped TiO₂ semiconductors. *Journals of chemical technology and biotechnology*, 92(1), 43–51. <https://doi-org.pbidi.unam.mx:2443/10.1002/jctb.5085>
- 173.
174. Vignoli, R. (2008). *Esterilización y desinfección*. Academia.Edu. Recuperado 12 de junio de 2021, de https://www.academia.edu/10818774/ESTERILIZACION_Y_DESINFECCION
175. Wang J., Hong Zhuang, Arthur Hinton, Brian Bowker, Jianhao Zhang, *Photocatalytic disinfection of spoilage bacteria Pseudomonas fluorescens and Micrococcus caseolyticus by nano- TiO₂*, LWT - Food Science and Technology,

Volume 59, Issue 2, Part 1, 2014, Pages 1009-1017, ISSN 0023-6438,
<https://doi.org/10.1016/j.lwt.2014.06.062>.
(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0023643814004307>)

176. Wang, Xuejiang Wang, Jianfu Zhao, Jingke Song, Jiayi Wang, Rongrong Ma, Jinxing Ma, *Solar light-driven photocatalytic destruction of cyanobacteria by F-Ce-TiO₂/expanded perlite floating composites*, Chemical Engineering Journal, Volume 320, 2017, Pages 253-263, ISSN 1385-8947, <https://doi.org/10.1016/j.cej.2017.03.062>.
(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1385894717303911>)
177. Whitman, W. B. (1998, 9 junio). *Prokaryotes: The unseen majority*. PNAS.
<https://www.pnas.org/content/95/12/6578.full>
178. Wilhelmi, I., Mohedano, R. B., y Sánchez-Fauquier, A. (2001). *Rotavirus y otros virus productores de gastroenteritis aguda en la infancia*. Sociedad Española de Enfermedades Infecciosas y Microbiología Clínica - Revisiones científicas.
<https://www.seimc.org/contenidos/ccs/revisionestematicas/viromicromol/ccs-2007-viromicromol1.pdf>
179. Xiong, Jiangyong Hu, *Inactivation/reactivation of antibiotic-resistant bacteria by a novel UVA/LED/ TiO₂ system*, Water Research, Volume 47, Issue 13, 2013, Pages 4547-4555, ISSN 0043-1354, <https://doi.org/10.1016/j.watres.2013.04.056>.
(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0043135413004053>)
180. Xiong, Jizhen Ma, Wun Jern Ng, T. David Waite, X.S. Zhao, *Silver-modified mesoporous TiO₂ photocatalyst for water purification*, Water Research, Volume 45, Issue 5, 2011, Pages 2095-2103, ISSN 0043-1354, <https://doi.org/10.1016/j.watres.2010.12.019>.
(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0043135410008663>)
181. Yu H., Liang Song, Yufang Hao, Na Lu, Xie Quan, Shuo Chen, Yaobin Zhang, Yujie Feng, *Fabrication of pilot-scale photocatalytic disinfection device by installing TiO₂ coated helical support into UV annular reactor for strengthening sterilization*, Chemical Engineering Journal, Volume 283, 2016, Pages 1506-1513, ISSN 1385-8947, <https://doi.org/10.1016/j.cej.2015.08.042>
(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1385894715011249>)
182. Zheng, Zhi-peng Shen, Can Cheng, Lei Shi, Rong Cheng, Dong-hai Yuan, *Photocatalytic disinfection performance in virus and virus/bacteria system by Cu-TiO₂ nanofibers under visible light*, Environmental Pollution, Volume 237, 2018, Pages 452-459, ISSN 0269-7491, <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.02.074>
(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0269749117346572>)