

Review:

Solar Photocatalysis: A Promising Technology for the Treatment of Organic Matter and Water Disinfection

Guillermo Centeno-Bordones*^{id}Centro de Investigaciones en Ambiente, Biología y Química, Facultad de Ciencias y Tecnología,
Universidad de Carabobo, Valencia, Venezuela

Recibido: junio 2021

Aceptado: agosto 2021

Autor para correspondencia: G. Centeno. e-mail: gcentenol@uc.edu.ve

DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.5722065>

Abstract

The review describes *advanced oxidation processes* (AOP), based on solar photochemistry and mainly aimed at heterogeneous catalytic processes with titanium dioxide. Various databases were used in the period from 2015 to 2020, to collect the information. Initially, the work addresses the issue of photocatalysts and their mechanism of action in the AOP of organic matter. Also, the experimental conditions of the different treatment systems of the resource for human consumption using this technology are described. In addition, reference is made to its application to the treatment of natural waste, and to the disinfection of rainwater, surface and deep well water with a view to its application in communities with limited drinking water supply.

Key words: drinking water; disinfection; photocatalysis; natural organic matter; solar radiation.

Estado del arte:

Fotocatálisis solar: una tecnología prometedora para el tratamiento de materia orgánica y desinfección de aguas

Resumen

El presente artículo de revisión describe los *procesos de oxidación avanzada* (POA), basados en fotoquímica solar, orientados principalmente a los procedimientos catalíticos heterogéneos con dióxido de titanio. Para la recolección de la información se emplearon diversas bases de datos en el periodo comprendido desde 2015 al 2020. Inicialmente, el trabajo aborda la temática de los fotocatalizadores y su mecanismo de acción en los POA de la materia orgánica. También, se describen las condiciones experimentales de los diferentes sistemas de tratamiento del recurso para consumo humano utilizando esta tecnología. Además, se hace referencia a su aplicación al tratamiento de los residuos naturales, y a la desinfección del agua de origen pluvial, superficial y de pozo profundo con miras a su aplicación en comunidades con limitaciones de suministro potabilizado.

Palabras claves: agua potable; desinfección; fotocatalisis; materia orgánica natural; radiación solar.

1. Introducción

El agua potable es esencial e imprescindible para los seres vivos, es más bien, una necesidad, y no un producto de mercado, por lo que se le considera un derecho humano [1]. Los esfuerzos de los científicos por mejorar el medio ambiente y el hábitat para elevar la calidad de vida de la población, dependen fundamentalmente de la disponibilidad de manantiales de este recurso; existiendo una estrecha relación entre su cualidad y accesibilidad con la salud y el crecimiento económico [2].

Las políticas públicas de salud y las tecnologías dirigidas a mejorar los sistemas del servicio de agua potable a toda la comunidad contribuyen a una disminución de la morbilidad y la mortalidad por enfermedades entéricas, en especial los colectivos más vulnerables, como son los pediátricos y los geriátricos. Las afecciones en estos grupos etarios están directa o indirectamente relacionadas con un abastecimiento caracterizado por escasos tratamientos fisicoquímicos [3].

Actualmente, el 20% de los habitantes en el mundo, alrededor de 1.400 millones, no tienen acceso al agua potable, y casi 4.000 millones de personas carecen de su suministro con el saneamiento adecuado, es decir, un 68% de la población del planeta. Según estimaciones de la Organización Mundial de la Salud (OMS) en su informe N° A71/28 del 2018 [4], el 80% de las enfermedades se transmiten a través de fuentes contaminadas [5].

Desde un punto de vista económico, el acceso al agua potable por todos los sectores del país es un factor importante en materia de salud [6]. Se ha comprobado que la inversión en plantas de tratamiento puede ser rentable, ya que, garantiza la prevención de las enfermedades transmitidas por esta vía, lo que influye directamente en la disminución de los costos por asistencia sanitaria [5, 7]. Además, la experiencia ha demostrado que las medidas destinadas a mejorar el suministro del preciado líquido favorecen en particular a la población más pobre, tanto de las zonas rurales como las urbanas y constituye una de las estrategias de mitigación de la pobreza [2, 8].

En un contexto técnico, el tratamiento del recurso hídrico es el conjunto de operaciones unitarias de

tipo físico, químico o biológico cuya finalidad es la eliminación o reducción de los aspectos no deseables de las aguas, bien sean naturales, de abastecimiento, de proceso o residuales [9]. Con respecto al tema, se dispone de una tecnología que permite mejorar los procedimientos de clarificación y desinfección, conocida como, *procesos de oxidación avanzada* (POA).

El mecanismo de actuación implica la formación de radicales hidroxilo ($\bullet\text{OH}$) de potencial de oxidación de 2.8 V. Su valor es mucho mayor, que el de otros oxidantes tradicionales. Estos radicales son capaces de oxidar compuestos orgánicos, principalmente por abstracción de hidrógeno o por adición electrofílica a dobles enlaces, favoreciendo la degradación de la materia orgánica considerablemente [10, 11, 12].

En el caso de los microorganismos, el oxígeno presente en los radicales ($\bullet\text{OH}$) ataca la bicapa lipídica que conforma la pared externa de su célula, generando reacciones de peroxidación letales para el microbio. Los POA abarcan procesos como ozono/luz UV, H_2O_2 /UV, ultrasonido, tratamientos electroquímicos, fotocátalisis y fotoquímica [13].

Una de las razones que ha hecho que los POA sean objeto de un creciente interés es la posibilidad de utilizar energía solar como fuente de radiación, con el consiguiente ahorro energético y ventajas medioambientales [14].

Adicionalmente, la fotocátalisis con dióxido de titanio (TiO_2) puede también ser utilizada como alternativa tecnológica para la desinfección primaria de agua, empleando radiación ultravioleta a 254 nm, mediante fuentes de mercurio o diodos emisores de luz [15]. Pero, los costos de instalación y mantenimiento que representa el uso de lámparas germicidas UV, en las instalaciones de tratamiento de potabilización a gran escala son elevados. Por esta razón, las investigaciones en fotocátalisis se han centrado en mejorar el rendimiento de la radiación UV emitida por el sol a fin de hacer rentable la aplicación de esta técnica.

El 7% del total de la radiación solar corresponde al espectro UV (teniendo en cuenta que un dispositivo de emisión es diseñado para concentrar 80 veces esta cantidad) [16]. No obstante, el estudio realizado por Posso *et al.* [17] afirma en términos generales, que en varias naciones de Suramérica

existe un potencial de uso de esta fuente, que puede ser factible de aprovechamiento como energía alternativa. Se ha observado que un 80 % de los países de la región alcanzan valores promedio superiores a los 5,1 kWh/m², el otro restante entre 6 y 8 kWh/m². Por lo tanto, el uso de reactores solares representa una opción viable en el manejo de POA como la fotocatalisis en el tratamiento de desinfección primaria de aguas.

La meta de esta investigación fue realizar una búsqueda especializada en fotocatalisis solar basada en sistemas catalíticos heterogéneos con dióxido de titanio, a fin de analizar su eficiencia para la eliminación de materia orgánica natural y la desinfección de aguas destinadas al consumo humano, con la perspectiva de aplicación en ámbitos rurales y zonas con problemas de abastecimiento.

2. Marco conceptual

2.1. Fotocatalizadores

Un fotocatalizador se define como una sustancia que acelera una reacción mediante la acción directa de una fuente de emisión de radiación ultravioleta y visible (UV – visible). Hernández y Prieto [18] afirman que la fotocatalisis puede considerarse como la aceleración de una fotoreacción mediante un catalizador fotosensibilizado. En el caso de los fotocatalizadores heterogéneos, se emplean comúnmente semiconductores (sólidos tipo óxido en suspensión acuosa o gaseosa). Existen múltiples fotosensibilizadores tales como: Al₂O₃, ZnO, Fe₂O₃, CuO, MnO y TiO₂, además, de compositos como Ag–BiVO₄ y *perovskita* entre otros [10, 19].

Este tipo de catalizadores tipo óxidos permiten la fotocatalisis heterogénea, que según Castillo [20] es un proceso que se basa en la absorción directa o indirecta de energía radiante de tipo UV – visible, por un sólido semiconductor de banda ancha, es decir, un material con valor de energía de activación mayor respecto a otros materiales; el cual modifica la velocidad de reacción química sin verse involucrado. Adicionalmente, se debe mencionar la presencia fundamental de O₂, debido a que sin su intervención se nota una supresión casi total de la actividad fotocatalítica del material [21, 22].

Clasificación y propiedades

Los semiconductores tipo óxido se pueden dividir en tres grupos con respecto al electrodo normal de hidrógeno (ENH) [10].

- *Reductivos*. Pueden producir la reducción del agua y generar H₂, sin embargo su potencial de oxidación es muy débil para oxidarla, como ejemplos se tienen: CdTe, CdSe y Si.
- *Redox*. En este caso existe la posibilidad de oxidar y reducir el agua, como por ejemplo: CdS, SrTiO₃, TiO₂, ZnO, Nb₂O₅.
- *Oxidativos*. Tienen la capacidad de oxidar el agua y generar O₂, ya que la banda de valencia está localizada a un potencial energético suficientemente negativo.

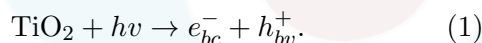
Las propiedades de los fotocatalizadores heterogéneos permiten que las reacciones de óxido-reducción transcurran en la superficie del catalizador, bien sea en una interface de tipo líquido-sólido o gas-sólido, generando radicales libres de oxígeno; facilitando la degradación e incluso la mineralización, de una gran variedad de compuestos orgánicos. En esta clase de reacciones, las condiciones de reacción son muy importantes, porque van a determinar la especiación en la que se encuentra el catalizador y la sustancia a oxidar, por lo que controlar los parámetros de temperatura, pH, tamaño de partícula, concentración del oxidante; es altamente relevante para las reacciones redox orgánicas [10].

Fotocatalisis con dióxido de titanio

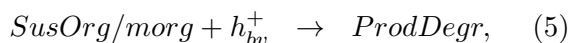
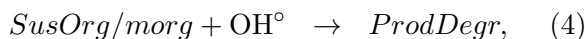
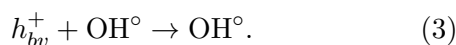
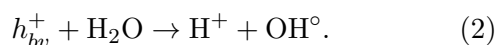
La fotocatalisis heterogénea implica la combinación de la fotoquímica con la catálisis. Tanto la luz como el catalizador son necesarios para alcanzar o acelerar una reacción química. En el caso de la fotocatalisis heterogénea, se emplean semiconductores sólidos en suspensión acuosa o gaseosa. El fotosensibilizador más ampliamente usado es el dióxido de titanio TiO₂ *Degussa P25* (nombre comercial), conformado por 99 % de anatasa y 1 % de rutilo. También, se tiene la especie formada por anatasa en un 70 % y por rutilo en un 30 %. Ambos compuestos presentan una alta actividad fotocatalítica; son estables en soluciones acuosas con costos asequibles y baja toxicidad [23]–[26].

Mecanismo de reacción

El proceso de fotocatalisis heterogénea sobre el TiO_2 se basa principalmente, en la iluminación del semiconductor de estructura cristalina (anatasa y rutilo) excitable con luz UV de mayor energía que la de su banda prohibida (E_g); La E_g anatasa TiO_2 tiene un valor de 3,2 eV y la de rutilo TiO_2 de 3,0 eV; los cuales corresponden a longitudes de onda del espectro UV (200 a 400 nm) lo que hace posible la promoción de un electrón (e^-) desde la banda de valencia (bv) hacia la banda de conducción (bc), dejando un *hueco positivo* (h^+) en la bv . Estos portadores de carga, electrón ($-$) y el hueco ($+$), pueden migrar hacia la superficie del semiconductor, quedando atrapados sobre las irregularidades de la superficie, reaccionando bien sea con un aceptor o donador apropiado de electrones, ver la Ecuación (1). Existe también la posibilidad que estos portadores de carga puedan recombinarse entre sí disipando el exceso de energía en forma de calor, según Nevárez *et al.* [21] y Centeno *et al.* [10].



Los huecos pueden ser atrapados por grupos hidroxilo o moléculas de agua adsorbidas en la superficie, produciendo radicales OH° , Ecuaciones (2) y (3), que poseen un potencial oxidativo alto (~ 1.7 mV) y son altamente reactivos con la materia orgánica y tóxicos para los microorganismos, ver Ecuaciones (4) y (5), según Nam *et al.* [27] y Nevárez *et al.* [21].



donde *SusOrg* representa a las *Sustancias orgánicas*, *morg* a los *microorganismos* y *ProdDegr* a los *Productos de degradación*.

Actualmente se reconoce que los defectos por vacancias de oxígeno en la superficie del TiO_2 juegan un papel esencial en la adsorción de O_2 ; la superficie del semiconductor tiene irregularidades

que atrapan a los electrones foto-promovidos a la banca de conducción, lo que conlleva a la formación de radicales superóxido ($\bullet\text{O}_2$), los cuales en medio acuoso y ligeramente ácido tienden a dismutarse para generar peróxido de hidrógeno (H_2O_2) que actuará también como aceptor de electrones foto-excitados para finalmente producir radicales OH° , tal como lo afirma Izquierdo [28].

3. Procedimientos fotocatalíticos para el de tratamiento de la materia orgánica natural

La materia orgánica natural (*MON*) (en inglés, *Natural Organic Matter*, *NOM*) deriva de la descomposición de residuos vegetales, animales y la actividad microbiana. Su presencia es común en las aguas superficiales y subterráneas, no representa una amenaza directa para la salud humana. No obstante, puede inducir la formación de otras especies químicas (carcinogénicas y mutagénicas entre otras), cuando entra en contacto con agentes oxidantes como el cloro durante el proceso de desinfección [29, 30]. La estrategia más común para la mitigación de la *MON* es la coagulación mejorada o ablandamiento con carbón activado granular (*CAG*), o filtración por membrana [9]. Esta práctica es a menudo suficiente para controlarla; sin embargo, también se ha investigado que los *POA* pueden ser altamente efectivos para su disminución.

3.1. Fotocatalisis utilizando dióxido de titanio con baja energía

Mayer *et al.* [31] evaluaron un procedimiento dirigido a reducir el contenido de contaminantes macro y micro orgánicos naturales utilizando fotocatalisis de dióxido de titanio con baja energía. Los aportes de energía de 1, 2 y 5 kWh/m^3 dieron como resultado la oxidación incompleta de la materia natural macro-orgánica. La tasa de eliminación a 254 nm fue tres veces mayor para la degradación del carbono orgánico disuelto (por sus siglas en inglés, *DOC*).

La metodología empleada mejoró la operación de los procesos de filtración. A 2 kWh/m^3 , se observó un aumento de la vida útil del filtro de *CAG*,

pasando a un rendimiento de 340 % en relación con el pretratamiento de filtración directa. Asimismo, la técnica fotocatalítica actúa disminuyendo la saturación del dispositivo de filtrado. Lo que resultó en tiempos de funcionamiento más largos. Igualmente, los niveles de DOC en el permeado de la membrana se optimizaron notablemente [31].

La fotocatalisis de baja energía no garantiza la eliminación de estrógenos complejos en medios acuosos, más allá de los niveles alcanzados mediante el empleo de fotólisis únicamente. Por esta razón, mientras más altas sean las entradas de energía UV, más elevados serán los niveles de eliminación de materia orgánica microcontaminante. En el caso de las especies macro-orgánicas el proceso también mejora considerablemente [31, 32].

3.2. Fotocatálisis empleando carbón activado modificado con dióxido de titanio

La presencia de sustancias húmicas en el agua es potencialmente peligrosa porque se consideran los principales precursores de los subproductos de desinfección (*SPD*), especialmente de trihalometanos (*THM*), formados durante el paso de cloración para alcanzar su potabilización [33]. La presencia de ácidos húmicos (*AH*) en el sistema de distribución favorece a las bacterias y su crecimiento en la red de abastecimiento, que puede conducir a graves problemas sanitarios. Los procesos habituales de tratamiento que implican filtración de arena, sedimentación y coagulación, generalmente son capaces de eliminar entre el 20 % y el 50 % de estas especies, lo que implica altos costos de operación y posible contaminación secundaria tóxica [33].

Orha *et al.* [34] investigaron el uso de carbón activado modificado con dióxido de titanio para el tratamiento avanzado de potabilización. En el estudio se modificó el carbón activado granular con anatasa. El compuesto (*CAG* - TiO_2) fue sintetizado por el método hidrotermal asistido por microondas y caracterizado morfo-estructuralmente. Posteriormente, los autores emplearon para la degradación y mineralización de los *AH* en aguas superficiales mediante fotocatalisis bajo radiación UV – visible. Su acción se comparó con el proceso de sorción tradicional.

La optimización de las condiciones de trabajo para su actividad fotocatalítica fueron alcanzadas a un pH de 7 con una dosis de catalizador de 1 g.L^{-1} para concentraciones entre 10 ppm y 25 ppm de las especies húmicas[33, 34].

También, la capacidad de reuso del material fue verificada. Los resultados muestran un nuevo sistema de filtrado para el tratamiento del agua potable, con propiedades sorbentes y autolimpiantes altamente satisfactorias [34].

3.3. Fotocatálisis con $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$

La crisis ambiental global y su influencia en las fuentes naturales evidencian el efecto que tienen las altas temperaturas y los largos períodos de sequía, resultando en la anoxia hipolimnética en lagos y embalses de forma generalizada; evento que conduce a la liberación de fósforo sedimentario, causando floraciones de algas no deseadas [35]. Los materiales orgánicos naturales que aportan sabor y olor son producidos principalmente por formación de cianobacterias como metabolitos secundarios [36].

El umbral del olor esta en el rango de los ng L^{-1} , lo que hace difícil su eliminación efectiva del agua potable. Los estudios demuestran que la mayoría de los compuestos característicos son resistentes a técnicas convencionales como coagulación, sedimentación y filtración para el proceso de potabilización, especialmente a muy bajas concentraciones [9].

La literatura reporta escasos métodos eficaces para eliminarlos a niveles tan bajos [37]. Los oxidantes como Cl_2 , ClO_2 y KMnO_4 han demostrado ser ineficientes en la degradación de estas especies debido a la resistencia de los alcoholes terciarios a la etapa de oxidación [38]. También, se ha empleado la filtración con carbón activado granular, arena y alumbre durante el proceso de coagulación, pero con resultados infructuosos en la mayoría de los casos [39].

Entre los compuestos orgánicos más comunes producidos por microorganismos en las aguas superficiales se encuentran el 2-metil isoborneol (*MIB*; umbral de olor 15 ng L^{-1}) y la geosmina (*GSM*; umbral de olor 4 ng L^{-1}). El *MIB* es un terpenoide producido por las cianobacterias, *actinomicetos*, *oscillatoria* y *phormidium*. La *GSM* es un alcohol terciario bicíclico producido

por *oscillatoria*, *anabaena*, *lyngbya*, *symploca* y *actinomicetos* [40, 41].

Yaparathne *et al.* [42] investigaron la fotodegradación de compuestos típicos del sabor y el olor en presencia de fotocatalizadores de $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$ inmovilizados. El experimento se realizó irradiando soluciones acuosas que contenían MIB y GSM con una fuente desde 350 nm a 400 nm, logrando la generación de radicales hidroxilo ($\bullet\text{OH}$), como producto de la actividad del fotocatalizador. Los resultados obtenidos muestran que las películas del catalizador modificado tienen la capacidad de fotodegradar las especies tratadas más eficientemente que el procedimiento con radiación UV – visible solamente. Estas películas catalizadoras pueden usarse para potenciar el efecto de irradiación UV solar, mejorando los sistemas de desinfección para la eliminación de las sustancias estudiadas y otros contaminantes orgánicos en instalaciones de tratamiento de agua potable [43].

4. Desinfección fotocatalítica de aguas pluviales

4.1. Cualidades

La calidad del agua de lluvia o pluvial es implícitamente mejor debido a su composición, ya que a diferencia de las superficiales, no están expuestas constantemente a agentes contaminantes [15, 44].

Si está bien tratada en cuanto a su recolección, distribución y almacenamiento puede ser empleada directamente para algunas funciones domésticas como: aseo sanitario, labores de lavado, limpieza de pisos, inodoros y riego de jardines. Así como también, para diferentes usos comerciales e industriales [45].

Para potabilizarla, se deben realizar purificaciones y desinfecciones más especializadas. Sin embargo, ello representaría un gasto adicional dependiendo del tipo de sistema de purificación que se decida implementar [15, 44, 45].

4.2. Sistema de purificación empleando nanofotocatálisis

Betancur *et al.* [46] comprobaron la purificación del agua de lluvia en un reactor de fotocatalisis

heterogénea nanoestructurado. Los investigadores demostraron que mediante la aplicación de técnicas nanofotocatalíticas se pueden generar especies reactivas de oxígeno ($\bullet\text{OH}$, $\bullet\text{O}_2$), las cuales degradan contaminantes orgánicos y eliminan microorganismos en el recurso pluvial.

El POA para la purificación del agua de lluvia recolectada y almacenada fue evaluado durante 5 años. Se utilizó un fotorreactor con TiO_2/UV visible/aire, en un lapso de tiempo de 15 min de tratamiento; posteriormente, los coliformes totales y *E. coli* fueron eliminados completamente [47].

Además, se obtuvo una disminución en la demanda química de oxígeno (DQO) de 44 a 39 mg/L; carbono orgánico total (COT) de 0,7588 a 0,4834 mg/L y de nitrógeno total (NT) de 6,2029 a 4,7385 mg/L. El estudio comprobó que el sistema de nanofotocatálisis es factible para el proceso de potabilizar aguas meteóricas, convirtiéndose en una tecnología alternativa de ser implementada en zonas rurales y de poco acceso a fuentes hídricas [46, 47].

4.3. Sistema de desinfección con fotocatalisis solar empleando dióxido de titanio

Agudelo *et al.* [15] comprobaron que la aplicación de la fotocatalisis heterogénea para la desinfección del agua de lluvia es efectiva utilizando radiación solar. La metodología se propone como una alternativa de potencial implementación y operación, porque busca el aprovechamiento de la radiación solar y las altas temperaturas haciéndola apta para emplearla en múltiples localidades, principalmente donde existan fuentes de abastecimiento pluvial que presenten bajos niveles de turbiedad.

Para verificar la efectividad de la técnica, se dispuso de una unidad compuesta por un sistema de captación de aguas de lluvias, un filtro lento de arena y un sistema de desinfección solar por fotocatalisis, que emplea como catalizador dióxido de titanio en forma de anatasa 99% en un lecho fijo. La caracterización inicial del afluente mostró valores de turbiedad de 3,29 UNT; pH de 6,4 y presencia de coliformes. Posteriormente, la eliminación de los microorganismos se hizo efectiva

en días con índices de radiación por encima de longitudes de onda de 315 a 400 nm, con clima soleados o parcialmente nublados y medidas de turbidez de 4,00 UNT. La eficiencia del proceso se reflejó en 60 % de remoción de la turbiedad y 100 % de eliminación de coliformes [15]. En base a los resultados obtenidos, el producto pluvial fototratado puede destinarse a usos domésticos, incluyendo el consumo humano en regiones rurales aisladas.

4.4. Consideraciones de la aplicación de la fotocatalisis a las aguas de lluvia

El sistema de tratamiento de fotocatalisis solar solo es eficiente, si la turbiedad del agua es baja; medidas altas de este parámetro impiden la actuación efectiva de los rayos ultravioleta con el fotocatalizador dióxido de titanio [15, 48].

La tecnología depende de las condiciones meteorológicas y climatológicas de la zona donde se implemente el proyecto. Las variables más importantes a tener en cuenta inicialmente son la radiación, la turbiedad, la presencia de coliformes y la temperatura; ya que determinan el diseño de las unidades de captación de agua lluvia, el tratamiento de filtración aplicado y la eficiencia de la desinfección solar. Los materiales adecuados para cada una de las etapas del tratamiento son filtro lento de arena para la carga hidráulica y la turbidez; equipo construido con vidrio Pyrex de cuarzo (100 % de transmitancia) para la incidencia de la radiación; tubo negro y tapa en acrílico para mejorar la absorción de calor (temperatura); y sistema de desinfección por fotocatalisis solar heterogénea con catalizador de dióxido de titanio para el tratamiento de los coliformes [45].

El proceso de desinfección por la fotocatalisis solar heterogénea, da lugar a la generación de radicales $\bullet\text{OH}$ en la superficie del fotocatalizador, que aunado a la absorción directa de la radiación UV por los microorganismos promueve la inactivación celular dando lugar a su eliminación [15, 49].

La implementación de un sistema de tratamiento constituido por filtración y desinfección por fotocatalisis solar, para un afluente producto de la captura de aguas de lluvia, puede contribuir significativamente en disminuir la carencia del

recurso en una zona de poco acceso al suministro potabilizado; no obstante, si el lugar donde se desea implementar el equipo piloto no cuenta con alta probabilidad de precipitación, se puede buscar otra fuente con bajos niveles de turbiedad para tratarla [15, 48].

El análisis de la etapa de filtración permitió evidenciar que a mayor carga hidráulica, menor eficiencia en cuanto a remoción de turbiedad, factor que influye en el paso de la radiación [46].

5. Desinfección primaria con fotocatalisis solar

En numerosas ocasiones el agua que llega a las viviendas de muchas comunidades rurales proviene de manantiales, ríos, arroyos, ojos de agua, pozos profundos u otros tipos de fuentes naturales casi siempre expuestas a contaminación [50], por lo que se tiene la necesidad de un sistema para su desinfección que sea barato y accesible para reducir la incidencia de las enfermedades transmitidas por esta vía.

5.1. Desinfección solar del agua (SODIS)

El proceso de desinfección solar del agua (por sus siglas en inglés, SODIS) es una tecnología simple, económica y ecológica empleada para mejorar su calidad microbiológica y adaptarla para el consumo humano. Es un tratamiento ideal para pequeños volúmenes y emplea botellas plásticas de tereftalato de polietileno (PET). Los recipientes son expuestos a la luz solar por seis horas, lo que causa un efecto de inactivación en los microorganismos por exposición a la radiación infrarroja y ultravioleta A (UVA, entre 340 y 400 nm). El procedimiento requiere que la turbiedad sea menor a 30 UNT [51].

5.2. Desinfección fotocatalítica – SODIS

Una variación del procedimiento SODIS es la incorporación de un fotocatalizador como el dióxido de titanio. Rico *et al.* [52] mejoraron el proceso utilizando un reactor solar fabricado de vidrio Pyrex (borosilicato con 80 % de transmitancia de radiación UV) en forma de botella con TiO_2 inmovilizado en sus paredes, donde se llevó a

cabo la desinfección oxidativa solar. Los resultados comparados con la técnica SODIS no modificada muestran la reducción de la exposición a la radiación solar de seis a dos horas, lo que representa un 66,67% de ahorro en términos de tiempo de operación; además, se incrementó la eficiencia para la inactivación de coliformes totales y fecales en un 100%, garantizándose también, que durante un periodo de almacenamiento de siete días no hay recrecimiento de estas especies. La Figura 1 ilustra el montaje del equipo empleado.

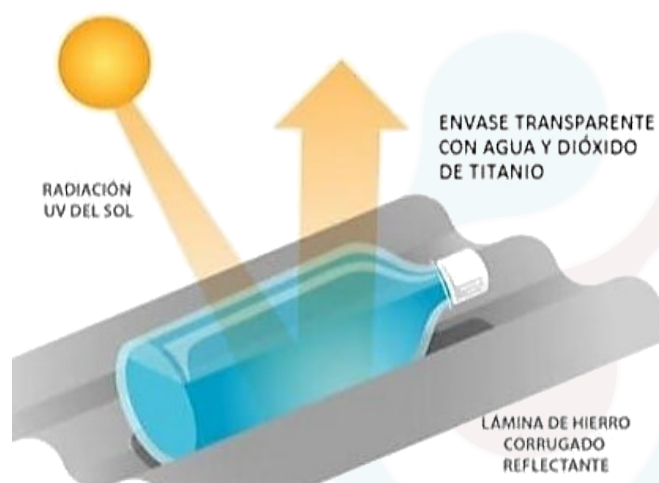


Figura 1: Arreglo experimental para desinfección solar de agua TiO_2 – SODIS.

Fuentes: Rico *et al.* [52] y Porley *et al.* [53].

La tecnología desarrollada se considera accesible y ambientalmente sostenible; el agua obtenida es apta para el consumo humano a nivel doméstico y puede ser implementada donde no hay acceso a la potabilizada [52, 53].

6. Desinfección secundaria con fotocátalisis solar

La inactivación química de los contaminantes microbiológicos presentes en la fuente natural es normalmente uno de los pasos finales de su purificación para reducir los microorganismos patógenos. La combinación de diferentes técnicas fisicoquímicas para la potabilización del agua, bien sea, de origen superficial o de pozo profundo tiene

como finalidad brindar un suministro seguro para la salud.

6.1. Desinfección secundaria convencional

Como medida adicional, en muchas plantas potabilizadoras utilizan un método secundario de desinfección, para evitar y proteger el suministro, de la contaminación biológica que pudiera producirse en la etapa de repartición a los consumidores [38]. Normalmente, se utiliza un tipo de desinfectante diferente al que se empleó durante el proceso de purificación primaria. El tratamiento secundario de desinfección se realiza comúnmente con cloro, y su aplicación asegura que las bacterias no se multipliquen en la red de distribución y tanques de almacenamiento.

El procedimiento es necesario, ya que los microorganismos pueden permanecer en el agua a pesar de estar sometida a una desinfección previa, o aparecer posteriormente, como consecuencia de retrolavados, o por mezcla con reservorios contaminados (ejemplo, por inclusión de microbios procedentes de los acuíferos subterráneos, que se introducen debido a grietas en el sistema de tuberías) [54].

La destrucción de los microorganismos se produce por la corrosión de su pared celular, lo que provoca cambios en la actividad del protoplasma celular o enzimático, impidiendo su multiplicación. Los desinfectantes también provocan la oxidación y destrucción de la materia orgánica que es generalmente su nutriente y fuente de alimentación [55].

6.2. Potencial de desinfección de TiO_2

Rosales[56] aplicó desinfección primaria mediante fotocátalisis a base de TiO_2 para tratar microbios en medios acuosos. Su trabajo demostró que el fotocatalizador tiene un gran capacidad para la desinfección e inactivación de patógenos nocivos como *Escherichia coli*. Su poder desinfectante se fundamenta en la generación superficial de especies reactivas de oxígeno (ROS), así como la libre formación de iones metálicos. El autor también expuso que el rendimiento puede ser significativamente mejorado a través de modificaciones en la estructura del material.

Los resultados de las investigaciones concuerdan, que el papel principal del radical hidroxilo es oxidar los componentes externos de la pared celular del microorganismo, seguido por la formación de poros en la membrana citoplasmática y finalmente, el ataque directo de los componentes intracelulares, lo que da como resultado la pérdida de su vitalidad [57, 58, 59].

A diferencia del cloro, la fotocatálisis con TiO_2 no tiene efecto residual [57]. Tras la fotoexcitación del catalizador se forman en la interfaz de la solución y en las partículas semiconductoras radicales hidroxilo ($\bullet\text{OH}$), que según la literatura, es el ion responsable de la inactivación de los microorganismos. Otras especies pueden contribuir en este proceso biocida, como es el caso de los radicales: superóxido ($\bullet\text{O}_2$), hidroperoxilo ($\bullet\text{O}_2\text{H}$) y el peróxido de hidrógeno (H_2O_2) [58, 59].

6.3. Material fotocatalítico a base de TiO_2 -RGO

Diversos materiales compuestos con TiO_2 han sido empleados en aguas para la desactivación de una amplia gama de microbianos perjudiciales para el ambiente y el ser humano (bacterias, hongos, algas y virus). La energía radiante artificial y natural se emplea para fotoactivar partículas de TiO_2 y nanoTiO_2 bien sea suspendidas o inmovilizadas contra una gran cantidad de microorganismos acuáticos como células bacterianas (*escherichia coli*, *enterococcus faecalis*, coliformes totales, *salmonella*, *seudomonas*) [54]. Partículas virales (fago MS2, ARN, bacteriófagos, phiX-17) [43], esporas de bacterias y hongos (*bacillus subtilis*, *Fusarium*, *candida albicans*, *aspergillus niger*, *phytophthora*) y parásitos acuáticos [14].

Investigaciones recientes de desinfección con TiO_2 se centran en microorganismos más resistentes como *bacillus spp.*, y esporas de *cryptosporidium*, *clostridium*, *ántrax*, entre otros [57].

El uso de nuevos materiales para fotocatalizadores con fotoactividad en el rango visible tiene un gran interés por las aplicaciones con radiación solar. Un ejemplo reciente es el dióxido de titanio con óxido de grafeno reducido (TiO_2 -RGO). El compuesto ha demostrado mejorar la eficiencia

fotocatalítica en esa región del espectro electromagnético para la inactivación bacteriana y fúngica en comparación con TiO_2 comercial. La alta actividad de TiO_2 -RGO se atribuyó a la producción de oxígeno singlete, causada por la excitación por la fuente de luz, conduciendo a la inactivación de *E. coli*; mientras que las esporas de *fusarium* permanecieron resistentes. La membrana de la célula del microorganismo es el objetivo probable para el oxidante (oxígeno singlete) que causa la pérdida de viabilidad celular. Otros estudios con fotosensibilizadores activos en la misma zona de radiación, demostraron que la generación de oxígeno singlete puede inactivar el *E. coli* y *deinococcus radiodurans* para la desinfección primaria de agua potable [57, 60, 61].

6.4. Influencia de la forma y tamaño de las partículas del fotocatalizador

La eficacia de las reacciones fotocatalíticas dependen del material, composición y estructura superficial, pero también de la configuración del catalizador en el reactor, este factor puede alterar significativamente el rendimiento del proceso [57].

La morfología de las nanopartículas del fotocatalizador también puede ser objeto de estudio durante la desinfección fotocatalítica. Malato *et al.* [57] investigaron cuatro formas y tamaños presentes en el dióxido de titanio, nanotubos (NT), nanoplacas (NPL), nanorods (NR) y nanoesferas (NS) para la inactivación de esporas de *F. solani* en agua. Los resultados demostraron que el tratamiento fotocatalítico solar aplicado a las esporas está relacionado con la exposición de las facetas de TiO_2 ; descubriendo que las NS tienen la mejor actividad de desinfección y eficiencia con respecto a las otras formas.

6.5. Maneras de empleo del dióxido de titanio

Hay dos formas de usar el TiO_2 para purificar el agua: una como partículas suspendidas; y la otra inmovilizado en una superficie apropiada. Los soportes que se usen para tal fin deben ser resistentes a los procedimientos fotocatalíticos y

también a las condiciones hidrodinámicas (flujo y presión) del foto-reactor durante el proceso [62].

El empleo de un tipo u otro de configuración está determinado por la solicitud o necesidad detectada. Si el sistema está diseñado para acondicionar el agua para consumo humano, el uso de partículas de TiO_2 suspendidas puede no ser aceptable debido a los posibles efectos tóxicos de los nanomateriales. Por lo tanto, las partículas del fotocatalizador tendrían que eliminarse por filtración antes de su consumo [62].

Para evitar este problema, se puede utilizar el TiO_2 soportado en el vidrio, plástico o cualquier otro material, pero esto resultará en una disminución de la eficiencia de la desinfección o en arreglos fotocatalíticos más complejos y por ende con mayores costos de ejecución [57, 63, 64].

7. Conclusiones

La fotocatalisis solar es considerada una tecnología sustentable energéticamente, que permite la disminución de la materia orgánica natural y la eliminación de microorganismos patógenos. Es una opción factible de ser aplicada en poblaciones rurales o de difícil acceso al agua potable. Mediante la implementación de la técnica se pueden realizar los procesos de clarificación y desinfección en las fuentes hídricas accesibles para los habitantes de la zona, a fin de asegurar su calidad para el consumo humano y otros usos domésticos.

Referencias

- [1] J. González G. *El acceso al agua potable como derecho humano, Su dimensión internacional*. Editorial Club Universitario, San José, Alicante, España, 2015.
- [2] J.A. Villena Ch. Calidad del agua y desarrollo sostenible. *Revista Peruana de Medicina Experimental y Salud Pública*, 35(2):304–308, 2018.
- [3] E.A. Vega A. Enfermedad de transmisión digestiva y factores riesgo. Aplicación de un método de evaluación rápida. *Gaceta Médica Espirituana*, 9(2):11–26, 2017.
- [4] OMS. Informe sobre los resultados de la OMS: presupuesto por programas 2016-2017. Informe A71/28, Organización Mundial de la Salud, París, 2018.
- [5] A. Mejía B., O. Castillo y R. Vera. Agua potable y saneamiento en la nueva ruralidad de América Latina. Resumen ejecutivo, CAF, Banco de Desarrollo de América Latina, Bogotá, 2016.
- [6] G. Correa-A. Acceso al agua, pobreza y desarrollo en Colombia. *Revista de la Universidad de la Salle*, 72:27–46, 2017.
- [7] P. Bohorquez-A. Aplicación de la metodología costo beneficio para la evaluación económica de proyectos de plantas de tratamiento de agua potable – Camaná. Trabajo de grado de maestría, Unidad de Posgrado de la Facultad de Administración, Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, Arequipa, Perú, 2019.
- [8] E. Segura-S. Estudio de nuevos fotocatalizadores para la obtención de combustibles solares. Tesis de máster universitario en ingeniería química, Departamento de Química, Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales, Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, España, 2017.
- [9] E. Salamanca. Tratamiento de aguas para el consumo humano. *Modulo Arquitectura CUC*, 17:29–48, 2016.
- [10] G. Centeno-B. y Y. Jiménez. Uso de lodos rojos como catalizador en los procesos de oxidación avanzada: una aproximación al estado del arte. *Tekhné*, 21(4):26–40, 2018.
- [11] M. Sillanpää, M. Ncibi, and A. Matilainen. Advanced Oxidation Processes for the Removal of Natural Organic Matter from Drinking Water Sources: A Comprehensive Review. *Journal of Environmental Management*, 208:56–76, 2018.
- [12] C. Remucal and D. Manley. Emerging Investigators Series: The Efficacy of Chlorine Photolysis as an Advanced Oxidation Process for Drinking Water Treatment. *Environmental Science: Water Research & Technology*, 2(4):565–579, 2016.

- [13] M.I. Stefan. *Advanced Oxidation Processes for Water Treatment: Fundamentals and Applications*. IWA publishing, Londres, II edition, 2017.
- [14] Y. Aguas, M. Hincapie, P. Fernández-I., and M.I. Polo-L. Solar Photocatalytic Disinfection of Agricultural Pathogenic Fungi (*Curvularia Sp.*) in Real Urban Wastewater. *Science of the Total Environment*, 607:1213–1224, 2017.
- [15] A.C. Agudelo, C.A. Terranova y J.P. Alcántara. Evaluación de un sistema de fotocatalisis heterogénea y pasteurización para desinfección de aguas lluvias. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 28(1):117–134, 2018.
- [16] S. González-L. y K. Pinto-A. Incidencia de la radiación solar, rayos UV y temperatura, en el crecimiento de coliformes totales y fecales en arena de playa puerto mocho en la ciudad de Barranquilla. Trabajo de Grado de Ingeniería, Programa de Ingeniería Ambiental, Departamento de Civil y Ambiental, Universidad de la Costa, Barranquilla, Colombia, 2018.
- [17] J. Posso, F. González, H. Guerra y H. Gómez. Estimación del potencial de energía solar en Venezuela utilizando sistemas de información geográfica. *Revista Geográfica Venezolana*, 55:27–43, 2014.
- [18] M. Hernández-L. y G. Prieto-S. El papel de la fotocatalisis en la protección ambiental y química verde. *Investigación Joven*, 4(1):40–44, 2017.
- [19] L. Lericci, C. Femanelli, E. Diguilio, L. Pierella y C. Saux. Síntesis y caracterización de fotocatalizadores de hierro soportado sobre zeolitas microporosas. *Revista Matéria*, 23(2), 2018.
- [20] A. Ungria-C. Regeneración de aguas depuradas mediante fotocatalisis heterogénea con dióxido de titanio: Análisis de variables influyentes. Trabajo de Grado de Ingeniería, Área de Tecnologías del Medio Ambiente, Departamento de Ingeniería Química y Tecnologías del Medio Ambiente, Escuela de Ingeniería y Arquitectura, Universidad de Zaragoza, Zaragoza, España, 2016.
- [21] M.C. Nevárez-M., P.J. Espinoza-M., F. J. Quiroz-C. y B. Ohtani. Fotocatálisis: inicio, actualidad y perspectivas a través del TiO_2 . *Avances en Química*, 12(2–3):45–59, 2017.
- [22] T. Su, Q. Shao, Z. Qin, Z. Guo, and Z. Wu. Role of Interfaces in Two-Dimensional Photocatalyst for Water Splitting. *ACS Catalysis*, 8(3):2253–2276, 2018.
- [23] W. Vallejo, C. Díaz-U., K. Navarro, R. Valle, J. Arboleda y E. Romero. Estudio de la actividad antimicrobiana de películas delgadas de dióxido de titanio modificado con plata. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 40(154):69–74, 2016.
- [24] A. Loaiza, C. Segura, I. Sierra y L. Portela. Evaluación del efecto de la temperatura de calcinación sobre la actividad fotocatalítica de cinco marcas de dióxido de titanio comerciales en la degradación de azul de metileno en presencia de radiación UV. En Encuentro Internacional de Educación en Ingeniería ACOFI. Bogotá Colombia, 2016.
- [25] V. Mendoza-E., E. Castaño-G., Á. González-G. y R. González-H. Efectos de intercambio y correlación en las propiedades estructurales y electrónicas del TiO_2 en la fase rutilo. *Ciencia en Desarrollo*, 8(1):161–168, 2017.
- [26] B. Barber-N. Estudio de la degradación fotocatalítica de naftaleno mediante compósitos de óxido de cerio-dióxido de titanio P25. Proyecto de investigación para optar al título de Ingeniero, Escuela Superior de Ingeniería Química e Industrias Extractivas, Instituto Politécnico Nacional, Ciudad de México, 2018.
- [27] S. Nam, H. Cho, J. Han, N. Her, and J. Yoon. Photocatalytic Degradation of Acesulfame K: Optimization Using the Box-behnken Design (Bbd). *Process Safety and Environmental Protection*, 113:10–21, 2018.

- [28] M. Izquierdo. Fotocatálisis: nanomateriales para combatir la contaminación y obtener energía. *Boletín del Grupo Español del Carbón*, 42:9–11, 2016.
- [29] M. Lemus-P. *Reacción del cloro con sustancias exopoliméricas provenientes de biopelículas de agua potable-subproductos de desinfección, características y toxicidad*. Tesis doctoral, Centro de Investigaciones en Ingeniería Ambiental, Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad de los Andes, Bogotá, 2017.
- [30] R. Sánchez-P. y K. García-G. Tratamiento de aguas residuales de cargas industriales con oxidación avanzada en sistemas convencionales. *Revista de Ciencias de la Vida*, 27(1):103–111, 2018.
- [31] B.K. Mayer, C. Johnson, Y. Yang, N. Wellenstein, E. Maher, and P.J. McNamara. From Micro to Macro-Contaminants: The Impact of Low-Energy Titanium Dioxide Photocatalysis Followed by Filtration on the Mitigation of Drinking Water Organics. *Chemosphere*, 217:111–121, 2019.
- [32] E. Rodríguez. *Eliminación de microcontaminantes orgánicos presentes en aguas residuales urbanas mediante MBR combinado con oxidación avanzada y con filtración por membranas*. Tesis doctoral, Instituto Universitario del Agua y las Ciencias Ambientales, Universidad de Alicante, Alicante, España, 2018.
- [33] J. Gramage-D. Utilización de sustancias tipo húmicas para un proceso de eliminación de contaminantes por membranas-tratamiento fotoquímico. Trabajo de fin de carrera, Departamento de Ingeniería Textil y Papelera, Escuela Politécnica Superior de Alcoy, Universitat Politècnica de València, Valencia, España, 2018.
- [34] C. Orha, R. Pode, F. Manea, C. Lazau, and C. Bandas. Titanium Dioxide-Modified Activated Carbon for Advanced Drinking Water Treatment. *Process Safety and Environmental Protection*, 108:26–33, 2017.
- [35] R. Bazán, M. García, J. M. Lozada, M. L. Chalimond, H. Herrero, M. Bonansea y A. Cossavella. Estudio multidisciplinario e interinstitucional de dos fuentes principales de agua potable para la Provincia de Córdoba. *Revista de la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 5:57–64, 2018.
- [36] E.A. Cantoral-U., A.D. Asencio-M. y M. Aboal-S. Cianotoxinas: efectos ambientales y sanitarios. Medidas de prevención. *Hidrobiológica*, 27(2):241–251, 2017.
- [37] A. Arellano y V. Lindao. Efectos de la gestión y la calidad del agua potable en el consumo del agua embotellada. *Novasinergia*, 2(1):15–23, 2019.
- [38] A. Campos y P. Vargas. Análisis técnico y ambiental de una planta de tratamiento compacta de agua potable en Villarrica-Tolima. *Boletín Semillas Ambientales*, 13(1):40–51, 2019.
- [39] S. Torres-S., I. Tapia-C., L. Goetschel-G. y E. Pazmiño-S. Análisis físico-químico e influencia de los minerales disueltos en el sabor del agua potable, de las principales plantas de tratamiento de Quito. *Enfoque UTE*, 11(4):57–70, 2020.
- [40] A. Gamón-O. Estudio de la problemática organoléptica en aguas potables asociadas a proliferaciones de algas en las fuentes de abastecimiento. Aplicación al caso de la ETAP el Realón en Picassent (Valencia). Trabajo de fin de carrera, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Universitat Politècnica de València, Valencia, España, 2017.
- [41] L. Rossel-B., R. Bernedo, L. Alberth, F. Mayhua, A. Ferro-G. y R.R. Zapana-Q. Radiación ultravioleta-c para desinfección bacteriana (coliformes totales y termotolerantes) en el tratamiento de agua potable. *Revista de Investigaciones Altoandinas*, 22(1):68–77, 2020.
- [42] S. Yaparathne, C. Tripp, and A. Amirbahman. Photodegradation of Taste and Odor Compounds in Water in the Presence of Immo-

- bilized TiO₂-SiO₂ Photocatalysts. *Journal of Hazardous Materials*, 346:208–217, 2018.
- [43] A. De la Cruz y D. Murcia. Eliminación de *E. coli* y *Pseudomona aeruginosa* de agua potable usando sistema de desinfección con luz ultravioleta y óxido de titanio. *Centros: Revista Científica Universitaria*, 8(1):87–100, 2019.
- [44] A. Costa-C., M.R. Gomes y P.M. Anco-E. Calidad de las aguas meteóricas en la ciudad de Itajubá, Minas Gerais, Brasil. *Revista Ambiente & Água*, 9(2):336–346, 2015.
- [45] M. Waso, S. Khan, A. Singh, S. McMichael, W. Ahmed, P. Fernandez-I., and W. Khan. Predatory Bacteria in Combination With Solar Disinfection and Solar Photocatalysis for the Treatment of Rainwater. *Water research*, 169:115–281, 2020.
- [46] C. Betancur-H., V. Hernández-Mo. y R. Buitrago-S. Nanopartículas para materiales antibacterianos y aplicaciones del dióxido de titanio. *Revista Cubana de Investigaciones Biomédicas*, 35(4):387–402, 2016.
- [47] N.A.B Ab A., P. Palaniandy, H. Abdul A., and D.A.D Aljuboury. Use of Photocatalysis for Conversion of Harvested Rainwater as an Alternative Source Into Drinking Water. *Global Nest Journal*, 20(2):243–256, 2018.
- [48] K. Omar, N. Aziz, S. Amr, and P. Palaniandy. Removal of Lindane and *Escherichia Coli* (*E. Coli*) From Rainwater Using Photocatalytic and Adsorption Treatment Processes. *Global Nest Journal*, 19(2):191–198, 2017.
- [49] S. Saran, P. Arunkumar, and S. Devipriya. Disinfection of Roof Harvested Rainwater for Potable Purpose Using Pilot-Scale Solar Photocatalytic Fixed Bed Tubular Reactor. *Water Science and Technology: Water Supply*, 18(1):48–59, 2018.
- [50] I. Ramírez y E. Muñoz. Adsorbentes y materiales utilizados para filtración y reducción de contaminantes en aguas potables. *Ciencia, Innovación y Tecnología*, 3:51–61, 2017.
- [51] M.B. Keogh, K. Elmusharaf, P. Borde, and K.G. McGuigan. Evaluation of the Natural Coagulant *Moringa oleifera* as a Pretreatment for SODIS in Contaminated Turbid Water. *Solar energy*, 158:448–454, 2017.
- [52] C. Rico, F. Dávila, F. Arredondo y L. García. Desinfección foto-catalítica del agua para consumo humano usando luz solar y dióxido de titanio (TiO₂) inmovilizado. Nota Técnica, Centro de Estudios Académicos sobre Contaminación Ambiental, Facultad de Química e Ingeniería de la Universidad Autónoma de Querétaro, Querétaro, México, 2018.
- [53] V. Porley, E. Chatzisyneon, B. Meikap, S. Ghosal, and N. Robertson. Field Testing of Low-Cost Titania-Based Photocatalysts for Enhanced Solar Disinfection (SODIS) in Rural India. *Environmental Science: Water Research & Technology*, 6(3):809–816, 2020.
- [54] L. Sosa y A. Sanjuan. Planta potabilizadora de agua de río con utilización de fotocatalisis heterogénea para desinfección primaria. Trabajo de Grado, Universidad Técnica Nacional, Santa Fe, Argentina, 2018.
- [55] A.B. Almendariz-G. Análisis microbiológico de las aguas del Parque de las Fuentes del cantón Guano, perteneciente a la provincia Chimborazo. Trabajo de Grado en Bioquímica Farmacéutica, Escuela de Bioquímica y Farmacia, Facultad de Ciencias, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba, Ecuador, 2017.
- [56] M.C. Rosales-V. *Síntesis controlada de semiconductores metal-óxido nanoestructurados y su efecto en el tratamiento de aguas contaminadas por fotocatalisis heterogénea*. Tesis Doctoral en Ciencias de la Ingeniería, Ciencia de los Materiales, Departamento de Ingeniería Química, Biotecnología y Materiales, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile, Santiago de Chile, 2020.
- [57] S. Malato, M. Maldonado, P. Fernandez-I., I. Oller, I. Polo, and R. Sánchez-M. Decontamination and Disinfection of Water by

- Solar Photocatalysis: The Pilot Plants of the *Plataforma Solar De Almería*. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 42(Part 1):15–23, 2016.
- [58] M.R. Martínez-G. y M.A.V. Pachés-G. Desinfección del agua: determinación colorimétrica del cloro libre y cloro total con DPD. Master tesis, Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, España, 2019.
- [59] D.P. Patiño-B., L.V. Pérez-A., M.I. Torres-C., D.A. Rosas-L. y G. Di Filippo-I. Uso de biocidas y mecanismos de respuesta bacteriana. *Revista Cubana de Investigaciones Biomédicas*, 37(3), 2018.
- [60] J. Pantoja-E., J. Proal-N., M. García-R., I. Cháirez-H. y G. Osorio-R. Eficiencias comparativas de inactivación de bacterias coliformes en efluentes municipales por fotólisis (UV) y por fotocatalisis (UV/TiO₂/SiO₂). Caso: depuradora de aguas de Salamanca, España. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 14(1):119–135, 2015.
- [61] L.V. Carvajal-R. y A.C. Quintero-A. Diseño, construcción y evaluación de un sistema piloto multifamiliar de desinfección solar de agua con bajos niveles de turbiedad a partir de fotocatalisis heterogénea y pasteurización como alternativa de suministro en épocas de escasez a la vereda de Los Soches. Trabajo de grado, Ingeniería Ambiental y Sanitaria, Facultad de Ingeniería, Universidad de La Salle, Bogotá, 2016.
- [62] G. Medina-P. y F. Fernández-L. Nanotoxicidad: retos y oportunidades. *Mundo Nano. Revista Interdisciplinaria en Nanociencias y Nanotecnología*, 11(20):7–16, 2018.
- [63] F.DeJ. Silerio V. Determinación de la eficiencia de degradación de DQO de fenol en solución acuosa por fotocatalisis solar heterogénea utilizando TiO₂ soportado sobre cuarzo y calcita. Trabajo de maestría, Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional, Unidad Durango, Instituto Politécnico Nacional, México, 2016.
- [64] M. Figueredo-F., S. Gutiérrez-A., A. Acevedo-M., and M.A. Manzano. Estimating Lethal Dose of Solar Radiation for Enterococcus Inactivation Through Radiation Reaching the Water Layer. Application to Solar Water Disinfection (SODIS). *Solar Energy*, 158:303–310, 2017.