



## Tecnologías para el tratamiento de aguas con radiación solar para el desarrollo sustentable: Una Revisión

### Solar irradiated water treatment technologies for sustainable development: A review

Jesús Rascón<sup>1,2\*</sup>, Jherson Culqui Huaman<sup>3</sup>, Wildor Gosgot Ángeles<sup>1</sup>, Manuel Oliva<sup>1</sup>, Yuri Reina Marin<sup>4</sup>, Dámaris Leiva-Tafur<sup>1</sup>, Oscar Gamarra Torres<sup>5</sup>

#### RESUMEN

La falta de tecnologías económicas y eficientes para el tratamiento de aguas es un problema global. Muchos investigadores buscan nuevas alternativas para el tratamiento de aguas que, reemplacen a las tecnologías tradicionales como la cloración, la filtración o la ebullición. Algunas de las tecnologías alternativas, son los que utilizan la radiación solar como los destiladores solares, el fotofenton o la desinfección solar (SODIS). Son tecnologías más económicas a comparación con las tradicionales, al utilizar la radiación solar como energía renovable, y por lo tanto el costo disminuye. Sin embargo, mediante estas tecnologías, no se pueden tratar grandes volúmenes de agua, como es el caso del SODIS que pueden tratar eficientemente bajos volúmenes de agua mediante el uso de botellas de politereftalato de etileno (PET). En el intento de mejorar las tecnologías basadas en radiación solar se han creado algunas como las bolsas SODIS o los colectores solares con espejos parabólicos, también llamados concentradores parabólicos compuestos (CPC). Aun así, también presentan una serie de inconvenientes. En el caso de las bolsas SODIS, dan un mal olor al agua tratada, mientras que, en el caso de los CPC el costo de su implementación es más elevado. Como una alternativa económica a todo esto, surgió la fotocatalisis que usa normalmente el Óxido de Titanio (TiO<sub>2</sub>) como fotocatalizador. Con ello se reducen los tiempos de exposición mediante reacciones redox, lo que hace que métodos como el SODIS sean más eficientes.

**Palabras clave:** desinfección solar, nuevas tecnologías, fotocatalisis, calidad agua.

#### ABSTRACT

The lack of economic and efficient water treatment technologies is a global problem. Many researchers are looking for new water treatment alternatives to replace traditional technologies such as chlorination, filtration, or boiling. Some alternative technologies use solar radiation, such as solar stills, photo-Fenton, or solar disinfection (SODIS). These technologies are more economical than traditional ones since they use solar radiation as renewable energy, and therefore the cost decreases. However, these technologies cannot treat large volumes of water, as is the case with SODIS, which can efficiently treat low volumes of water by using polyethylene terephthalate (PET) bottles. To improve technologies based on solar radiation, some have been created, such as SODIS bags or solar collectors with parabolic mirrors, also called compound parabolic concentrators (CPC). However, they also have some drawbacks. In the case of SODIS bags, they give a foul odor to the treated water, while, in the case of CPCs, the cost of their implementation is higher. As an economical alternative to all this, photocatalysis emerged, which usually uses titanium oxide (TiO<sub>2</sub>) as a photocatalyst. This reduces exposure times using redox reactions, which makes methods such as SODIS more efficient.

**Keywords:** solar disinfection, new technologies, photocatalysis, water quality.

<sup>1</sup>Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas, Instituto de Investigación para el Desarrollo Sustentable de Ceja de Selva, Chachapoyas, Perú

<sup>2</sup>Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas, Escuela de Post Grado, Chachapoyas, Perú

Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas, Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental, Chachapoyas, Perú

<sup>3</sup>Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas, Facultad de Ingeniería Zootecnista, Agronegocios y Biotecnología, Chachapoyas, Perú

<sup>4</sup>Universidad de Jaén, Jaén, Perú

\* Autor de correspondencia. E-mail: [jesus.rascon@untrm.edu.pe](mailto:jesus.rascon@untrm.edu.pe)

## I. INTRODUCCIÓN

El agua, es un elemento líquido, de vital importancia para todos los seres vivos. Ya sea para realizar procesos biológicos o para desarrollar actividades, tanto domésticas como económicas (Martin, 2001; Westall y Brack, 2018). En tal sentido, es de gran importancia tanto cuidar la calidad ecológica del agua, como asegurar un suministro de agua adecuada para el consumo humano (Petrovic *et al.*, 2011). Sin embargo, en pleno siglo XXI un adecuado acceso al agua es uno de los mayores desafíos de los países en desarrollo. Todo esto empeora a nivel mundial debido a la gran contaminación del agua, que se genera principalmente por actividades como la industria, la agricultura y la ganadería (Li y Yang, 2021; Jain, 2012; Gazzeh y Abubakar, 2018). Se estima que cerca de 2 millones de personas consumen agua con presencia de contaminantes como heces, ocasionando que alrededor de medio millón de personas mueran al año, a causa de enfermedades diarreicas o gastrointestinales, por consumir agua contaminada (Jin *et al.*, 2017; Pichel *et al.*, 2019).

Como solución a este problema, existen diferentes tecnologías tradicionales para el tratamiento de las aguas. Algunas de estas son la filtración, la sedimentación, la floculación o la cloración entre otros (Kim *et al.*, 2003; Bratby, 2016; Kato *et al.*, 2018; Medeiros *et al.*, 2020; Lapointe *et al.*, 2020; Long *et al.*, 2020; Qian *et al.*, 2020). Aunque estas tecnologías se siguen mejorando, algunos de los problemas que presentan, es que usan productos con potencial tóxico, como el cloro, o que no destruyen el contaminante, sino que es transferido a otra fase, requiriendo de otra técnica para su tratamiento completo o final (Gil Pavas, 2002; Alcaraz *et al.*, 2019; Mansor y Tay, 2020). Debido a los altos costos de las tecnologías tradicionales, se buscan tecnologías alternativas, que puedan aprovechar las energías renovables, como la radiación solar (Pichel *et al.*, 2019). Algunas de estas tecnologías son, los destiladores solares, el fotofenton, la desinfección solar (SODIS, en sus siglas en inglés) o el SODIS mejorado (Pérez *et al.*, 2002; Fisher *et al.*, 2011; Yuan *et al.*, 2011; McGuigan *et al.*, 2012; Borde *et al.*, 2016;

Zhang *et al.*, 2018; Vorontsov, 2019; Elbar y Hassan, 2020). Estas tecnologías han demostrado ser eficientes y de bajo costo para la desinfección de aguas contaminadas (Keogh *et al.*, 2015; Zhang *et al.*, 2018).

Una de las tecnologías solares más prometedoras es el SODIS, que, desde inicios del siglo XXI, se promueve en los países en desarrollo a través de sensibilización, campañas de información y capacitaciones. Actualmente, el SODIS es utilizado por más de 2 millones de personas en más de 33 países (Meierhofer y Landolt 2009; K'oreje *et al.*, 2020; Porley *et al.*, 2020). El tratamiento de aguas con SODIS, generalmente se realiza con botellas de polietileno tereftalato (PET), siendo una técnica de bajo costo. Sin embargo, requiere de tiempos prolongados de exposición a la radiación solar, dificultando su implementación en lugares donde la intensidad de la radiación es muy variable (Schmid *et al.*, 2008; McGuigan *et al.*, 2012; Asiimwe *et al.*, 2013). Como solución, se buscan mejores técnicas basadas en los mismos principios, como los colectores parabólicos compuestos (CPC), bolsas SODIS o la aplicación de fotocatalizadores al SODIS (McLoughlin *et al.*, 2004; Byrne *et al.*, 2011; Lawrie *et al.*, 2015; Gutiérrez-Alfaro *et al.*, 2017; Cioccolanti *et al.*, 2019; Cowie *et al.*, 2020; Roshith *et al.*, 2021).

En este artículo, se presenta una revisión bibliográfica relacionada con las tecnologías de tratamiento de aguas basadas en energía solar. Se busca motivar a los investigadores a evaluar este tipo de tecnologías como alternativa de mejora, e incrementar el rendimiento en el tratamiento de aguas, con respecto a las tecnologías tradicionales.

## II. SODIS

La desinfección solar del agua, también conocido como SODIS, es una técnica económica y fácil de usar. Es ideal para el tratamiento de pequeñas cantidades de agua contaminada con microorganismos patógenos, metales pesados, etc. Es una tecnología adecuada para el tratamiento de agua doméstica, además de poder usarse en comunidades con ingresos bajos, al depender solo de la radiación solar (McGuigan *et al.*, 2012;

Castro-Alfárez *et al.*, 2018). El uso más común del SODIS, consiste en llenar botellas de plástico transparente de polietileno tereftalato (PET) con agua contaminada. Las botellas se exponen directamente a la luz solar por un periodo de 6 a 48 horas, dependiendo de la sensibilidad del contaminante y de la intensidad de la radiación solar del lugar (Polo-López *et al.*, 2019; Martínez *et al.*, 2020).

### III. TECNOLOGÍAS SODIS SIN FOTOCATÁLISIS

#### Botellas PET

El PET es el material más utilizado debido a que es transparente, impermeable al CO<sub>2</sub> y fácil de manejar (Filella, 2020). Debido a estas características, las botellas de PET son muy utilizadas como reactores SODIS, y son los más utilizados en comparación a las botellas echas de PVC (Carratalà *et al.*, 2016; García-Gil *et al.*, 2020). Usar este tipo de botellas para el SODIS tiene varias ventajas, entre ellas, no cambiar el olor ni el sabor del agua tratada o ser difíciles de romper. Sin embargo, también presenta algunas desventajas, como la deformación de su estructura con temperaturas superiores a los 65 °C, o el poco volumen de agua que se puede desinfectar, generalmente unos 2 litros. También requieren de mucha radiación y tiempo prolongado para que el SODIS sea eficiente, por lo que en algunos lugares no se puede implementar. El transcurso del tiempo también afecta al material, ya que lo envejece (Schmid *et al.*, 2008; McGuigan *et al.*, 2012; Asiimwe *et al.*, 2013).

#### Bolsas SODIS

Para evitar dificultades limitantes por la falta de botellas PET, se han desarrollado las bolsas SODIS como alternativa. Al igual que las botellas, las bolsas están hechas de PET, con una parte superior transparente y una parte inferior de color negro. Su gran ventaja respecto a las botellas, es que cuentan con una mayor área de exposición, y una profundidad de agua de unos 6 cm. Por tanto, la relación del área de exposición con el volumen de agua se incrementa, mejorando el proceso de tratamiento. En comparación a las botellas PET, pueden soportar temperaturas más altas, y

tienen la ventaja de que se pueden transportar y almacenar fácilmente en grandes cantidades (Lawrie *et al.*, 2015; Gutiérrez-Alfaro *et al.*, 2017).

#### Colectores parabólicos compuestos

En el SODIS, usando tanto botellas como bolsas, la radiación solar directa solo incide en la parte superior del material, que contiene el agua a tratar. Para mejorar esta desventaja y aprovechar mejor la radiación, se han desarrollado tecnologías, como los colectores parabólicos compuestos (CPC) (Fernández *et al.*, 2005; Xu y Qu, 2013). Los CPC, concentran la radiación solar mediante espejos parabólicos, reflejando toda la radiación solar, tanto la directa como la difusa, de tal manera que la radiación puede llegar hasta la parte inferior del colector, haciendo que el tratamiento del agua sea más homogéneo y más rápido que los del tratamiento SODIS convencionales (Gómez-Couso *et al.*, 2012; Mortazavi y Maleki; 2020). Los CPC acortan el tiempo de exposición requerido para el tratamiento del agua de 6 a 8 horas. Al mismo tiempo, hace que los efectos negativos de la turbidez disminuyan (Ubomba-Jaswa *et al.*, 2010; Tanveer y Tezcanli Guyer, 2013; Strauss *et al.*, 2018). Sin embargo, aunque sean relativamente baratos, se requiere de una inversión inicial medianamente fuerte. Por tanto, los costos son más elevados en comparación con el uso de botellas o bolsas, haciendo más difícil su implementación para el tratamiento del agua potable en poblaciones con bajos recursos (Baccioli *et al.*, 2017; Su *et al.*, 2017; Tian *et al.*, 2018).

### IV. FOTOCATÁLISIS PARA MEJORAR EL SODIS

Una forma de mejorar la desinfección del agua, es la fotocatalisis mediante el empleo de fotocatalizadores como el dióxido de titanio (TiO<sub>2</sub>) (Cowie *et al.*, 2020; Porley *et al.*, 2020). Los fotocatalizadores, gracias a su naturaleza, aprovechan mejor la radiación solar, optimizando y reduciendo los tiempos de exposición a la radiación solar (Sreeja y Shetty, 2017; Levchuk *et al.*, 2019). La fotocatalisis, acelera la fotorreacción para eliminar compuestos orgánicos y otros contaminantes presentes en las aguas por vertidos industriales, urba-

nos y agrícolas (Aguado *et al.*, 2002; Hincapié-Mejía *et al.*, 2011; Fiorenza *et al.*, 2020; Long *et al.*, 2020).

### Mecanismo de fotocatalisis

La fotocatalisis, como se ha mencionado antes, es un proceso donde se necesita de un fotocatalizador para producirse dicha reacción. Los fotocatalizadores, cuentan con una serie de estructuras semiconductoras, que actúan cuando la radiación solar recibida es igual o mayor a la longitud de onda de la banda prohibida o de la brecha energética, dándose una “excitación”, que normalmente depende del tipo de fotocatalizador. Cuando se genera la excitación del fotocatalizador, se produce la transición de un electrón de la banda de valencia hacia la banda de conducción, formando excitones o pares de electrones huecos, llamados así porque van dejando huecos en la banda de valencia. Estos excitones seguidamente realizan reacciones redox en la superficie del fotocatalizador, con las moléculas de agua o con moléculas aceptoras de electrones, como es el oxígeno ( $O_2$ ). Los electrones pueden reaccionar con el  $O_2$  formando radicales libres. Así mismo, los huecos formados en la banda de valencia reaccionan con las moléculas de agua adsorbida formando radicales hidroxilos (-OH), los cuales son capaces de degradar los compuestos orgánicos (Keane *et al.*, 2014; Gligorovski *et al.*, 2015; Fagan *et al.*, 2016; Laxma Reddy *et al.*, 2017)

### Materiales para fotocatalisis

Para el proceso de fotocatalisis, se han investigado muchos compuestos para ser usados como fotocatalizadores. Los más comunes son los sulfuros metálicos y los óxidos metálicos, como el dióxido de titanio ( $TiO_2$ ), el sulfuro de zinc (ZnS), el óxido de zinc (ZnO) o el óxido de hierro ( $Fe_2O_3$ ); aunque también se han usado metales como el aluminio (Al) (Lee y Park, 2013; Lee *et al.*, 2016; Gar Alalm *et al.*, 2018; Czech *et al.*, 2020; Hitam y Jalil, 2020). Dentro de todos estos compuestos, el  $TiO_2$  es el más usado como fotocatalizador para el tratamiento de aguas. Principalmente, gracias a su gran actividad fotocatalítica, su naturaleza no tóxica, su fotoestabilidad, su bajo grado de insolubilidad en condiciones normales y su bajo costo (Dun-

lop *et al.*, 2010). Así mismo, es una sustancia abundante, que presenta gran estabilidad en soluciones acuosas. Al mismo tiempo, hay gran cantidad de investigaciones, que demuestran que la degradación de contaminantes por la fotocatalización con  $TiO_2$ , es una alternativa muy eficiente, en comparación con otras técnicas de oxidación que usan otros fotocatalizadores (Haque y Muneer, 2007; Zhang y Sillanpää, 2020; Serrà *et al.*, 2021).

### Fotocatalizador fijo o suspendido

Los fotocatalizadores, se pueden fijar bajo un sustrato como soporte, o suspenderse en una solución acuosa dentro de los reactores fotocatalíticos (botellas, bolsas o estructuras de vidrio). Generalmente son usadas como partículas suspendidas (Fernández *et al.*, 2005; Laxma Reddy *et al.*, 2017; Xing *et al.*, 2018). Sin embargo, teniendo en cuenta su operatividad y por las aplicaciones prácticas, es preferible utilizar reactores con fotocatalizadores fijos, ya que permiten una operación continua (Liu *et al.* 2020; Samy *et al.* 2020; Sraw *et al.* 2018). El material utilizado como soporte se puede reutilizar durante varios años, y no es necesario separar las partículas del fotocatalizador, a diferencia de los fotocatalizadores suspendidos, lo que incrementa los costos (Manassero *et al.*, 2017)

## V. SODIS, FOTOCATÁLISIS Y CALIDAD DEL AGUA

La eficiencia y la velocidad de la reacción fotocatalítica dependen de parámetros como el pH, la temperatura, el tipo de fotocatalizador, la carga de fotocatalizador, la intensidad y longitud de onda de la luz y el tiempo de reacción, entre otros. Por tanto, la calidad inicial del agua a tratar, es de gran importancia (Malato *et al.*, 2009; Friedmann *et al.*, 2010; Nguyen *et al.*, 2020)

### pH

El efecto del pH durante el proceso de reacción de la fotocatalisis, es un campo de investigación complicado de interpretar, por sus múltiples funciones en el proceso fotocatalítico. El pH, influye tanto en la disolución de moléculas, como en las electrointeracciones estáticas entre la superficie del semiconductor,

radicales libres y sustrato formados durante el proceso de reacción. Por lo tanto, el pH del agua, es un parámetro a tener en cuenta en las reacciones fotocatalíticas que se desarrollan en las superficies del fotocatalizador. Principalmente, porque determina las propiedades de carga superficial del fotocatalizador y, por tanto, el comportamiento de adsorción de los contaminantes (Haque y Muneer, 2007; Nguyen *et al.*, 2020). Normalmente el proceso de fotocatálisis es más eficiente en medios ácidos (Manassero *et al.*, 2017). En el caso del TiO<sub>2</sub>, tiene un punto de carga cero cuando el pH es cercano a 6,5, cargándose positivamente cuando está por debajo de este valor y cargándose negativamente cuando está por encima (Wang y Ku, 2007; Friedmann *et al.*, 2010).

### **Temperatura**

La fotocatálisis tiene la ventaja de poder ser utilizada a temperatura ambiente. Sin embargo, la reacción fotocatalítica se puede optimizar ajustando la temperatura para mejorar dicha actividad (Foteinis y Chatzisy-meon, 2020). Es un factor a tener en cuenta cuando la fotocatálisis, depende del tipo de material empleado como fotocatalizador, dado que las fluctuaciones de la temperatura pueden generar diferentes efectos (Meng *et al.*, 2018). El aumento de la temperatura en cada proceso, mejora los rendimientos cuánticos de irradiación y reacciones entre moléculas de agua y radicales. La descomposición de los contaminantes es más eficiente en cortos tiempos exposición, cuando la temperatura incrementa cerca de 60 °C con ayuda de luz ultravioleta (Zhang *et al.*, 2016).

Así mismo, se ha observado que el aumento de la temperatura en unos 40 °C, cuando se usan fotocatalizadores como el TiO<sub>2</sub> y ZnO, tiene un efecto positivo sobre la actividad fotocatalítica, mejorando la eficacia de remoción (Meng *et al.*, 2018).

### **Características y concentración del catalizador**

Otro parámetro importante para la fotocatálisis es la característica del catalizador, es decir, la forma, la estructura, el tamaño, el área superficial y la concentración del catalizador añadido al reactor. Este último, es el que refleja directamente la eficiencia y los costos

del funcionamiento del proceso (Foteinis y Chatzisy-meon, 2020; Nguyen *et al.*, 2020). La forma del fotocatalizador afecta al área superficial, a la velocidad de reacción y al área de contacto entre los reactivos y el fotocatalizador. Cuanto menor es la partícula del fotocatalizador, mayor es la superficie del área y, por tanto, es mayor la concentración de sitios activos por metro cuadrado (Ahmed y Haider, 2018). El incremento de la cantidad de fotocatalizador empleado, es directamente proporcional con la eficiencia de la eliminación del contaminante, y la velocidad de la reacción fotocatalítica (Sun *et al.*, 2006; Malato *et al.*, 2009; Davididou *et al.*, 2017).

### **Intensidad y longitud de onda de la luz**

Al inicio de una reacción fotocatalítica, la intensidad de luz no tiene tanta dependencia para el proceso. Sin embargo, si se requiere incrementar la velocidad de la reacción, se necesita una intensidad de luz más alta. La intensidad de la luz, proporciona la energía suficiente para el proceso de degradación de los contaminantes. Mientras que, la longitud de onda es la que genera la excitación de electrones para producir las reacciones redox. Por lo tanto, la longitud de onda debe ser acorde a la capacidad de absorción del fotocatalizador utilizado. Por ejemplo, en el caso del TiO<sub>2</sub>, se requiere una longitud de onda igual a 380 nm (Gaya y Abdullah, 2008; Davididou *et al.*, 2017)

La intensidad de luz se puede dividir en tres fases, intensidad baja, intensidad intermedia e intensidad alta. En la fase uno, la reacción fotocatalítica es de forma lineal; en la fase dos, la velocidad de la reacción aumenta; y en la fase tres, la tasa de degradación de contaminantes se vuelve independiente de la intensidad de la luz (Ahmed y Haider, 2018; Foteinis and Chatzisy-meon, 2020; Nguyen *et al.*, 2020).

### **Oxígeno disuelto**

El oxígeno disuelto (OD) es otro parámetro clave, dada que la reacción fotocatalítica, así como la mineralización, necesitan de este parámetro. Además, contribuye a la estabilización de los radicales. Se ha visto, que la tasa de oxidación depende de la concentración de oxígeno. Al mismo tiempo, el OD también propor-

ciona la fuerza de flotación en los reactores fotocatalíticos para la suspensión de partículas de  $\text{TiO}_2$  (Chong *et al.*, 2010; Ahmed y Haider, 2018).

### **Bacterias**

El tratamiento de las aguas contaminadas con bacterias patógenas mediante la desinfección solar, consiste en inactivar o matar por completo este tipo de bacterias presentes en el agua, causándoles daños fatales. Por otro lado, los fotocatalizadores tienen la capacidad de inactivar a las bacterias, alterando su pared celular o dañando su ADN y ARN, y luego oxidando sus componentes internos (Byrne *et al.*, 2018). Tanto el SODIS sin fotocátalisis, como con fotocátalisis, son dos tecnologías eficientes para la desinfección de aguas. Las bacterias fecales como *Salmonella typhimurium*, *Escherichia coli* y *Enterococcus faecalis* son fáciles de inactivar, con cortos tiempos de exposición. En cambio, las bacterias que forman endosporas como *Bacillus subtilis* son más resistentes y en 20 horas de exposición no se logran inactivar al 100% (Masunga *et al.*, 2019; Endo-Kimura *et al.*, 2020). El SODIS con fotocátalisis solo requiere de 30 minutos para destruir la concentración de bacterias fecales a cero. En cambio, el SODIS sin fotocátalisis requiere de más de 60 minutos para lograr el mismo efecto. Otra ventaja de tratar aguas contaminadas mediante SODIS con fotocátalisis, es que durante siete días no se observan recrecimientos de bacterias, mientras que mediante SODIS sin fotocátalisis pueden aparecer estas bacterias, tras el primer día de almacenamiento (McGuigan *et al.*, 2012; Porley *et al.*, 2020).

### **Materia orgánica**

Conocer cómo se comporta la materia orgánica, respecto a cada tecnología solar es primordial. Con ello, se puede conocer de manera más general el grado de oxidación de todos los compuestos presentes, y el grado en que éstos se pueden tratar mediante estas tecnologías (Malato *et al.*, 2007; Gomes *et al.*, 2019). El SODIS, tanto con o sin fotocátalisis, presenta una gran eficacia en la reducción de los parámetros de materia orgánica, como la Demanda Química de Oxígeno (DQO) y la Demanda Bioquímica de Oxígeno

(DBO), sobre todo cuando se usa  $\text{TiO}_2$  como fotocatalizador (Jia *et al.*, 2011; Hassan *et al.*, 2016; Hassansahi y Karimi-Jashni, 2018).

## **VII. COSTO-BENEFICIO DE LA TECNOLOGÍAS BASADAS EN RADIACIÓN SOLAR**

Los beneficios de estas tecnologías basadas en radiación solar, se deben evaluar no solo en términos de eficacia, sino también en términos del costo de implementación. Para que la tecnología a aplicar se considere viable, hay que tener en cuenta los beneficios en calidad, rapidez y cantidad de volumen de agua tratada, que puede generar un valor agregado. Los beneficios generados al usar estas tecnologías, son principalmente la mejora de la salud, la mejora en el capital económico de las familias al reducir los casos de morbilidad, la disminución del uso de combustibles para hervir el agua, y en general reduce los costos de atención médica ocasionados por enfermedades infecciosas por el consumo de un agua contaminada (McGuigan *et al.*, 2012). En cuanto a los costos económicos, cabe destacar las diferencias que hay en los costos para el tratamiento del agua según la tecnología a usar. Los costos por el tratamiento con tecnologías solares, como el SODIS, tiene un valor aproximado de 0,63 dólares por cada litro de agua. Mientras que las tecnologías tradicionales, como la cloración o la floculación tienen un coste aproximado de 0,66 y 4,95 dólares por cada litro de agua, respectivamente (Clasen *et al.*, 2007; Rogers *et al.*, 2019).

## **VIII. CONCLUSIONES**

Existe mucha necesidad de tratamiento de agua especialmente en países en desarrollo, debido a esto se han desarrollado muchas investigaciones, comprobando que las tecnologías basadas en radiación solar, como el SODIS son económicas y fáciles de utilizar para la desinfección de agua. Sin embargo, estas tecnologías presentan algunos inconvenientes, como el material a utilizar. Es por ello, que se ha buscado mejorar estas tecnologías como es el caso de los CPC. No obstante, la eficiencia y rapidez de tratamiento a veces no es la

esperado. Incluso, en algunos lugares no se pueden aplicar por las pocas horas de radiación solar. Para no tener este problema, se han desarrollado mejoras para estas tecnologías, como la adición de un proceso de fotocatalisis, tratando de buscar el material que mejor funcione como fotocatalizador. Viendo que el  $\text{TiO}_2$  es la mejor elección como catalizador debido a su alta capacidad oxidante, baja pérdida y su no toxicidad.

### IX. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo de revisión se realizó como parte del proyecto “Determinación del impacto de la actividad ganadera sobre la calidad del agua y establecimiento de medidas de prevención y mitigación ante la contaminación en las principales microcuencas de la Región Amazonas” -PREMIGA, financiado por el Programa Nacional de Innovación Agraria (PNIA) y ejecutado por el Instituto de Investigación para el Desarrollo Sustentable de Ceja de Selva (INDES-CES) de la UNTRM. También se contó con apoyo del proyecto “Creación de los servicios del centro de investigación en climatología y energías alternativas de la Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza - Región Amazonas” -PROCICEA, financiado por el Sistema Nacional de Inversión Pública (SNIP) del Ministerio de Economía y Finanzas del Perú (MEF) y ejecutado por el Instituto de Investigación para el Desarrollo Sustentable de Ceja de Selva (INDES-CES) de la UNTRM.

### X. CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Todos los autores participaron en la redacción del manuscrito inicial, revisión bibliográfica, y en la revisión y aprobación del manuscrito final.

### XI. CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran no tener conflicto de intereses.

### XII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Aguado, J., R. Van Grieken, M. J. López-Muñoz, y J. Marugán. 2002. “Removal of Cyanides in Wastewater by Supported  $\text{TiO}_2$ -Based

Photocatalysts”. *Catalysis Today* 75: 95–102. DOI: 10.1016/S0920-5861(02)00049-4

Ahmed, S. N., y W. Haider. 2018. “Heterogeneous Photocatalysis and Its Potential Applications in Water and Wastewater Treatment: A Review”. *Nanotechnology* 29 (34). DOI: 10.1088/1361-6528/aac6ea

Alcaraz, L., I. García-Díaz, L. González, M. E. Rabanal, A. Urbieto, P. Fernández, y F. A. López. 2019. “New Photocatalytic Materials Obtained from the Recycling of Alkaline and Zn/C Spent Batteries”. *Journal of Materials Research and Technology* 8 (3): 2809–18. DOI: 10.1016/j.jmrt.2019.04.020

Asimwe, J. K., B. Quilty, C. K. Muyanja, y K. G. McGuigan. 2013. “Field Comparison of Solar Water Disinfection (SODIS) Efficacy between Glass and Polyethylene Terephthalate (PET) Plastic Bottles under Sub-Saharan Weather Conditions”. *Journal of Water and Health* 11 (4): 729–37. DOI: 10.2166/wh.2013.197

Baccioli, A., M. Antonelli, y U. Desideri. 2017. “Dynamic Modeling of a Solar ORC with Compound Parabolic Collectors : Annual Production and Comparison with Steady-State Simulation”. *Energy Conversion and Management* 148: 708–23. DOI:10.1016/j.enconman.2017.06.025

Borde, P., K. Elmusharaf, K. G. McGuigan, y M. B. Keogh. 2016. “Community Challenges When Using Large Plastic Bottles for Solar Energy Disinfection of Water (SODIS)”. *BMC Public Health* 931: 1–8. DOI: 10.1186/s12889-016-3535-6.

Bratby, J. 2016. *Coagulation and Flocculation in Water and Wastewater Treatment*. Londres (Reino Unido): IWA Publishing.

Byrne, C., G. Subramanian, y S. C. Pillai. 2018. “Recent Advances in Photocatalysis for Environmental Applications”. *Journal of Environmental Chemical Engineering* 6(3): 3531–55. DOI: 10.1016/j.jece.2017.07.080

Byrne, J. Anthony, P. A. Fernandez-Ibañez, P. S. M.

- Dunlop, D. M. A. Alrousan, y J. W. J. Hamilton. 2011. "Photocatalytic Enhancement for Solar Disinfection of Water: A Review". *International Journal of Photoenergy* 2011: 798051. DOI: 10.1155/2011/798051
- Carratalà, A., A. D. Calado, M. J. Mattle, R. Meierhofer, S. Luzi, y T. Kohn. 2016. "Solar Disinfection of Viruses in Polyethylene Terephthalate Bottles". *Applied and Environmental Microbiology* 82 (1): 279–88. DOI: 10.1128/AEM.02897-15
- Castro-Alfárez, M., M. I. Polo-López, J. Marugán, y P. Fernández-Ibáñez. 2018. "Validation of a Solar-Thermal Water Disinfection Model for Escherichia Coli Inactivation in Pilot Scale Solar Reactors and Real Conditions". *Chemical Engineering Journal* 331: 831–40. DOI: 10.1016/j.cej.2017.09.015
- Chong, M. N., B. Jin, C. W. K. Chow, y C. Saint. 2010. "Recent Developments in Photocatalytic Water Treatment Technology: A Review". *Water Research* 44 (10): 2997–3027. DOI: 10.1016/j.watres.2010.02.039
- Cioccolanti, L., S. R. Hamedani, y M. Villarini. 2019. "Environmental and Energy Assessment of a Small-Scale Solar Organic Rankine Cycle Trigenation System Based on Compound Parabolic Collectors". *Energy Conversion and Management* 198 (May): 111829. DOI: 10.1016/j.enconman.2019.111829
- Clasen, T., L. Haller, D. Walker, J. Bartram, y S. Cairncross. 2007. "Cost-Effectiveness of Water Quality Interventions for Preventing Diarrhoeal Disease in Developing Countries". *Journal of Water and Health* 5 (4): 599–608. DOI: 10.2166/wh.2007.010
- Cowie, B. E., V. Porley, y N. Robertson. 2020. "Solar Disinfection (SODIS) Provides a Much Underexploited Opportunity for Researchers in Photocatalytic Water Treatment (PWT)". *ACS Catalysis* 10 (20): 11779–82. DOI: 10.1021/acscatal.0c03325
- Czech, B., P. Zygmunt, Z. C. Kadirova, K. Yubuta, y M. Hojamberdiev. 2020. "Effective Photocatalytic Removal of Selected Pharmaceuticals and Personal Care Products by Elsmoreite/Tungsten Oxide@ZnS Photocatalyst". *Journal of Environmental Management* 270 (5): 110870. DOI: 10.1016/j.jenvman.2020.110870
- Davididou, K., E. Hale, N. Lane, E. Chatzisyneon, A. Pichavant, y J. F. Hochepped. 2017. "Photocatalytic Treatment of Saccharin and Bisphenol-A in the Presence of TiO<sub>2</sub> Nanocomposites Tuned by Sn(IV)". *Catalysis Today* 287: 3–9. DOI: 10.1016/j.cattod.2017.01.038
- Dunlop, P. S. M., A. Galdi, T. A. McMurray, J. W. J. Hamilton, L. Rizzo, y J. A. Byrne. 2010. "Comparison of Photocatalytic Activities of Commercial Titanium Dioxide Powders Immobilised on Glass Substrates". *Journal of Advanced Oxidation Technologies* 13 (1): 99–106. DOI: 10.1515/jaots-2010-0113
- Elbar, A. R. A., y H. Hassan. 2020. "Enhancement of Hybrid Solar Desalination System Composed of Solar Panel and Solar Still by Using Porous Material and Saline Water Preheating". *Solar Energy* 204 (2): 382–94. DOI: 10.1016/j.solener.2020.04.058
- Endo-Kimura, M., B. Karabiyik, K. Wang, Z. Wei, B. Ohtani, A. Markowska-Szczupak, y E. Kowalska. 2020. "Vis-Responsive Copper-Modified Titania for Decomposition of Organic Compounds and Microorganisms". *Catalysts* 10 (10): 1–27. DOI: 10.3390/catal10101194
- Fagan, R., D. E. McCormack, D. D. Dionysiou, y S. C. Pillai. 2016. "A Review of Solar and Visible Light Active TiO<sub>2</sub> Photocatalysis for Treating Bacteria, Cyanotoxins and Contaminants of Emerging Concern". *Materials Science in Semiconductor Processing* 42: 2–14. DOI: 10.1016/j.mssp.2015.07.052



- Fernández, P., J. Blanco, C. Sichel, y S. Malato. 2005. "Water Disinfection by Solar Photocatalysis Using Compound Parabolic Collectors". *Catalysis Today* 101 (3-4): 345–52. DOI: 10.1016/j.cattod.2005.03.062
- Filella, M. 2020. "Antimony and PET Bottles: Checking Facts". *Chemosphere* 261: 127732. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2020.127732
- Fiorenza, R., A. Di Mauro, M. Cantarella, C. Iaria, E. M. Scalisi, M. V. Brundo, A. Gulino, L. Spitaleri, G. Nicotra, S. Dattilo, S. C. Carroccio, V. Privitera, y G. Impellizzari. 2020. "Preferential Removal of Pesticides from Water by Molecular Imprinting on  $TiO_2$  Photocatalysts". *Chemical Engineering Journal* 379 (6): 122309. DOI: 10.1016/j.cej.2019.122309
- Fisher, M. B., M. Iriarte, y K. L. Nelson. 2011. "Solar Water Disinfection (SODIS) of *Escherichia coli*, *Enterococcus* spp., y MS2 Coliphage: Effects of Additives and Alternative Container Materials". *Water Research* 46 (6): 1745–54. DOI: 10.1016/j.watres.2011.12.048
- Foteinis, Spyros, y Efthalia Chatzisyneon. 2020. "Heterogeneous Photocatalysis for Water Purification. Nanostructured Photocatalysts". En *Nanostructured Photocatalysts From Materials to Applications in Solar Fuels and Environmental Remediation*. Boukherroub, R., S. B. Ogale y N. Robertson (eds). Londres (Reino Unido): INC. DOI: 10.1016/b978-0-12-817836-2.00004-1
- Friedmann, D., C. Mendive, y D. Bahnemann. 2010. "TiO<sub>2</sub> for Water Treatment: Parameters Affecting the Kinetics and Mechanisms of Photocatalysis". *Applied Catalysis B: Environmental* 99 (3–4): 398–406. DOI: 10.1016/j.apcatb.2010.05.014
- Gar Alalm, M., M. Samy, S. Ookawara, y T. Ohno. 2018. "Immobilization of S-TiO<sub>2</sub> on Reusable Aluminum Plates by Polysiloxane for Photocatalytic Degradation of 2,4-Dichlorophenol in Water". *Journal of Water Process Engineering* 26 (11): 329–35. DOI: 10.1016/j.jwpe.2018.11.001
- García-Gil, Á., C. Pablos, R. A. García-Muñoz, K. G. McGuigan, y J. Marugán. 2020. "Material Selection and Prediction of Solar Irradiance in Plastic Devices for Application of Solar Water Disinfection (SODIS) to Inactivate Viruses, Bacteria and Protozoa". *Science of the Total Environment* 730: 139126. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.139126
- Gaya, U. I., y A. H. Abdullah. 2008. "Heterogeneous Photocatalytic Degradation of Organic Contaminants over Titanium Dioxide: A Review of Fundamentals, Progress and Problems". *Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews* 9 (1): 1–12. DOI: 10.1016/j.jphotochemrev.2007.12.003
- Gazzeah, K., y I. R. Abubakar. 2018. "Regional Disparity in Access to Basic Public Services in Saudi Arabia: A Sustainability Challenge". *Utilities Policy* 52 (4): 70–80. DOI: 10.1016/j.jup.2018.04.008
- Gil Pavas, E. 2002. "Fotocatálisis: Una Alternativa Viable Para La Eliminación de Compuestos Orgánicos". *Revista Universidad EAFIT* 38 (127): 59–64.
- Gligorovski, S., R. Strekowski, S. Barbati, y D. Vione. 2015. "Environmental Implications of Hydroxyl Radicals (-OH)". *Chemical Reviews* 115 (24): 13051–13092. DOI: 10.1021/cr500310b
- Gomes, J., A. Matos, M. Gmurek, R. M. Quinta-Ferreira, y R. C. Martins. 2019. "Ozone and Photocatalytic Processes for Pathogens Removal from Water: A Review". *Catalysts* 9 (1): 1–23. DOI: 10.3390/catal9010046
- Gómez-Couso, H., M. Fontán-Sainz, P. Fernández-Ibáñez, y E. Ares-Mazás. 2012. "Speeding up the Solar Water Disinfection Process (SODIS) against *Cryptosporidium Parvum* by Using 2.5l Static Solar Reactors Fitted with Com-

- pound Parabolic Concentrators (CPCs)". *Acta Tropica* 124 (3): 235–42. DOI: 10.1016/j.actatropica.2012.08.018
- Gutiérrez-Alfaro, S., A. Acevedo, M. Figueredo, M. Saladin, y M. A. Manzano. 2017. "Accelerating the Process of Solar Disinfection (SODIS) by Using Polymer Bags". *Journal of Chemical Technology and Biotechnology* 92 (2): 298–304. DOI: 10.1002/jctb.5005
- Haque, M. M., y M. Muneer. 2007. "Photodegradation of Norfloxacin in Aqueous Suspensions of Titanium Dioxide". *Journal of Hazardous Materials* 145 (1–2): 51–57. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2006.10.086
- Hassan, M., Y. Zhao, y B. Xie. 2016. "Employing TiO<sub>2</sub> Photocatalysis to Deal with Landfill Leachate: Current Status and Development". *Chemical Engineering Journal* 285: 264–75. DOI: 10.1016/j.cej.2015.09.093
- Hassanshahi, N., y A. Karimi-Jashni. 2018. "Comparison of Photo-Fenton, O<sub>3</sub>/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/UV and Photocatalytic Processes for the Treatment of Gray Water". *Ecotoxicology and Environmental Safety* 161 (6): 683–90. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2018.06.039
- Hincapié-Mejía, G. M., D. Ocampo, G. M. Restrepo, y J. M. Marín. 2011. "Fotocatálisis Heterogénea y Foto-Fenton Aplicadas Al Tratamiento de Aguas de Lavado de La Producción de Biodiesel". *Informacion Tecnológica* 22 (2): 33–42. DOI: 10.4067/S0718-07642011000200005
- Hitam, C. N. C., y A. A. Jalil. 2020. "A Review on Exploration of Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Photocatalyst towards Degradation of Dyes and Organic Contaminants". *Journal of Environmental Management* 258 (January): 110050. DOI: 10.1016/j.jenvman.2019.110050
- Jain, R. 2012. "Providing Safe Drinking Water: A Challenge for Humanity". *Clean Technologies and Environmental Policy* 14 (1): 1–4. DOI: 10.1007/s10098-011-0446-1
- Jia, C., Y. Wang, C. Zhang, y Qiaoyan Qin. 2011. "UV-TiO<sub>2</sub> Photocatalytic Degradation of Landfill Leachate". *Water, Air, and Soil Pollution* 217 (1–4): 375–85. DOI: 10.1007/s11270-010-0594-7
- Jin, Y, Y. Wang, Q. Huang, L. Zhu, Y. Cui, L. Cui, y C. Lin. 2017. "The Experimental Study of a Hybrid Solar Photo-Fenton and Photovoltaic System for Water Purification". *Energy Conversion and Management* 135: 178–87. DOI: 10.1016/j.enconman.2016.12.073
- K'oreje, K. Otiemo, M. Okoth, H. Van Langenhove, y K. Demeestere. 2020. "Occurrence and Treatment of Contaminants of Emerging Concern in the African Aquatic Environment: Literature Review and a Look Ahead". *Journal of Environmental Management* 254 (10): 109752. DOI: 10.1016/j.jenvman.2019.109752
- Kato, R., T. Asami, E. Utagawa, H. Furumai, y H. Katayama. 2018. "Pepper Mild Mottle Virus as a Process Indicator at Drinking Water Treatment Plants Employing Coagulation-Sedimentation, Rapid Sand Filtration, Ozonation, y Biological Activated Carbon Treatments in Japan". *Water Research* 132: 61–70. DOI: 10.1016/j.watres.2017.12.068
- Keane, D. A., K. G. McGuigan, P. Fernández-Ibáñez, M. I. Polo-López, J. A. Byrne, P. S. M. Dunlop, K. O'Shea, D. D. Dionysiou, y S. C. Pillai. 2014. "Solar Photocatalysis for Water Disinfection: Materials and Reactor Design". *Catalysis Science and Technology* 4 (5): 1211–26. DOI: 10.1039/c4cy00006d
- Keogh, M. B., M. Castro-Alfárez, M. I. Polo-López, I. Fernández-Calderero, Y. A. Al-Eryani, C. Joseph-Titus, B. Sawant, R. Dhodapkar, C. Mathur, K. G. McGuigan, P. Fernández-Ibáñez. 2015. "Capability of 19-L Polycarbonate Plastic Water Cooler Containers for Efficient Solar Water Disinfection (SODIS): Field Case Studies in India, Bahrain

- and Spain”. *Solar Energy* 116: 1–11. DOI: 10.1016/j.solener.2015.03.035
- Kim, J., Y. Chung, D. Shin, M. Kim, Y. Lee, Y. Lim, y D. Lee. 2003. “Chlorination By-Products in Surface Water Treatment Process”. *Desalination* 151 (1): 1–9. DOI: 10.1016/S0011-9164(02)00967-0
- Lapointe, M., J. M. Farner, L. M. Hernandez, y N. Tufenkji. 2020. “Understanding and Improving Microplastic Removal during Water Treatment: Impact of Coagulation and Flocculation”. *Environmental Science and Technology* 54 (14): 8719–27. DOI: 10.1021/acs.est.0c00712
- Lawrie, K., A. Mills, M. Figueredo-Fernández, S. Gutiérrez-Alfaro, M. Manzano, y M. Saladin. 2015. “UV Dosimetry for Solar Water Disinfection (SODIS) Carried out in Different Plastic Bottles and Bags”. *Sensors and Actuators, B: Chemical* 208: 608–15. DOI: 10.1016/j.snb.2014.11.031
- Laxma Reddy, P. V., B. Kavitha, P. A. Kumar Reddy, y K. H. Kim. 2017. “TiO<sub>2</sub>-Based Photocatalytic Disinfection of Microbes in Aqueous Media: A Review”. *Environmental Research* 154 (1): 296–303. DOI: 10.1016/j.envres.2017.01.018
- Lee, K. M., C. Wei Lai, K. Sing Ngai, y J. Ching Juan. 2016. “Recent Developments of Zinc Oxide Based Photocatalyst in Water Treatment Technology: A Review”. *Water Research* 88: 428–48. DOI: 10.1016/j.watres.2015.09.045
- Lee, S. Y., y S. J. Park. 2013. “TiO<sub>2</sub> Photocatalyst for Water Treatment Applications”. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry* 19 (6): 1761–69. DOI: 10.1016/j.jiec.2013.07.012
- Levchuk, I., J. Moreno-Andrés, J. J. Rueda-márquez, P. Dzik, M. Ángel, M. Sillanpää, M. A. Manzano, y R. Vahala. 2019. “Solar Photocatalytic Disinfection Using Ink-Jet Printed Composite TiO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub> Thin Films on Flexible Substrate: Applicability to Drinking and Marine Water”. *Solar Energy* 191: 518–29. DOI: 10.1016/j.solener.2019.09.038
- Li, X., y H. Y. Yang. 2021. “A Global Challenge: Clean Drinking Water”. *Global Challenges* 5 (1): 2000125. DOI: 10.1002/gch2.202000125
- Liu, J., Z. Liu, C. Piao, S. Li, J. Tang, D. Fang, Z. Zhang, y J. Wang. 2020. “Construction of Fixed Z-Scheme Ag|AgBr/Ag/TiO<sub>2</sub> Photocatalyst Composite Film for Malachite Green Degradation with Simultaneous Hydrogen Production.” *Journal of Power Sources* 469: 228430. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2020.228430.
- Long, Y., X. You, Y. Chen, H. Hong, B. Qiang Liao, y H. Lin. 2020. “Filtration Behaviors and Fouling Mechanisms of Ultrafiltration Process with Polyacrylamide Flocculation for Water Treatment”. *Science of the Total Environment* 703: 135540. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.135540
- Long, Z., Q. Li, T. Wei, G. Zhang, y Z. Ren. 2020. “Historical Development and Prospects of Photocatalysts for Pollutant Removal in Water”. *Journal of Hazardous Materials* 395: 122599. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2020.122599
- Malato, S., P. Fernández-Ibáñez, M. I. Maldonado, J. Blanco, y W. Gernjak. 2009. “Decontamination and Disinfection of Water by Solar Photocatalysis: Recent Overview and Trends”. *Catalysis Today* 147 (1): 1–59. DOI: 10.1016/j.cattod.2009.06.018
- Malato, S., J. Blanco, D. C. Alarcón, M. I. Maldonado, P. Fernández-Ibáñez, y W. Gernjak. 2007. “Photocatalytic Decontamination and Disinfection of Water with Solar Collectors”. *Catalysis Today* 122 (1–2): 137–49. DOI: 10.1016/j.cattod.2007.01.034
- Manassero, A., M. L. Satuf, y O. M. Alfano. 2017. “Photocatalytic Reactors with Suspended and Immobilized TiO<sub>2</sub>: Comparative Efficiency Evaluation”. *Chemical Engineering Journal*

- 326: 29–36. DOI: 10.1016/j.cej.2017.05.087
- Mansor, N. A., y K. S. Tay. 2020. “Potential Toxic Effects of Chlorination and UV/Chlorination in the Treatment of Hydrochlorothiazide in the Water”. *Science of the Total Environment* 714: 136745. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.136745
- Martin, F. C. 2001. “Water: Importance To Life”. *Biochemistry and Molecular Biology Education* 29 (1): 54–59. DOI: 10.1111/j.1539-3429.2001.tb00070.x
- Martínez, N. N., J. M. Ribera, S. Hausmann-Muela, M. Cevallos, S. M. Hartinger, A. Christen, y D. Mäusezahl. 2020. “The Meanings of Water: Socio-Cultural Perceptions of Solar Disinfected (SODIS) Drinking Water in Bolivia and Implications for Its Uptake”. *Water (Switzerland)* 12 (2): 12020442. DOI: 10.3390/w12020442
- Masunga, N., O. Kelebogile Mmelesi, K. K. Kefeni, y B. B. Mamba. 2019. “Recent Advances in Copper Ferrite Nanoparticles and Nanocomposites Synthesis, Magnetic Properties and Application in Water Treatment: Review”. *Journal of Environmental Chemical Engineering* 7 (3): 103179. DOI: 10.1016/j.jece.2019.103179
- McGuigan, K. G., R. M. Conroy, H. J. Mosler, M. du Preez, E. Ubomba-Jaswa, y P. Fernandez-Ibañez. 2012. “Solar Water Disinfection (SODIS): A Review from Bench-Top to Roof-Top”. *Journal of Hazardous Materials* 235–236: 29–46. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2012.07.053
- McLoughlin, O. A., P. Fernández Ibañez, W. Gernjak, S. Malato Rodríguez, y L. W. Gill. 2004. “Photocatalytic Disinfection of Water Using Low Cost Compound Parabolic Collectors”. *Solar Energy* 77 (5): 625–33. DOI: 10.1016/j.solener.2004.05.017
- Medeiros, R. C., N. de, B. L.S. Freitas, L. P. Sabogal-Paz, M. T. Hoffmann, J. Davis, P. Fernandez-Ibañez, y J. A. Byrne. 2020. “Drinking Water Treatment by Multistage Filtration on a Household Scale: Efficiency and Challenges”. *Water Research* 178: 115816. DOI: 10.1016/j.watres.2020.115816
- Meierhofer, R., y G. Landolt. 2009. “Factors Supporting the Sustained Use of Solar Water Disinfection - Experiences from a Global Promotion and Dissemination Programme”. *Desalination* 248 (1–3): 144–51. DOI: 10.1016/j.desal.2008.05.050
- Meng, F., Y. Liu, J. Wang, X. Tan, H. Sun, S. Liu, y S. Wang. 2018. “Temperature Dependent Photocatalysis of G-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, TiO<sub>2</sub> and ZnO: Differences in Photoactive Mechanism”. *Journal of Colloid and Interface Science* 532: 321–30. DOI: 10.1016/j.jcis.2018.07.131
- Mortazavi, S. M., y A. Maleki. 2020. “A Review of Solar Compound Parabolic Collectors in Water Desalination Systems”. *International Journal of Modelling and Simulation* 40 (5): 339–54. DOI: 10.1080/02286203.2019.1626539
- Nguyen, D. N., H. M. Bui, y H. Q. Nguyen. 2020. *Heterogeneous Photocatalysis for the Removal of Pharmaceutical Compounds. Current Developments in Biotechnology and Bioengineering*. Lomdres (Reino Unido): Elsevier B.V. DOI: 10.1016/b978-0-12-819594-9.00007-3
- Pérez, M., F. Torrades, X. Domènech, y J. Peral. 2002. “Fenton and Photo-Fenton Oxidation of Textile Effluents”. *Water Research* 36 (11): 2703–10. DOI: 10.1016/S0043-1354(01)00506-1
- Petrovic, M., A. Ginebreda, V. Acuña, R. J. Batalla, A. Elosegi, H. Guasch, M. L. de Alda, R. Marcopé, I. Muñoz, A. Navarro-Ortega, E. Navarro, D. Vericat, S. Sabater, D. Barceló. 2011. “Combined Scenarios of Chemical and Ecological Quality under Water Scarcity in Mediterranean Rivers”. *TrAC - Trends in Analytical*

- Chemistry* 30 (8): 1269–78. DOI: 10.1016/j.trac.2011.04.012
- Pichel, N., M. Vivar, y M. Fuentes. 2019. “The Problem of Drinking Water Access: A Review of Disinfection Technologies with an Emphasis on Solar Treatment Methods”. *Chemosphere* 218 (3): 1014–1030. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2018.11.205
- Polo-López, M. I., A. Martínez-García, M. J. Abeledo-Lameiro, H. H. Gómez-Couso, E. E. Ares-Mazás, A. Reboredo-Fernández, T. D. Morse, L. Buck, K. Lungu, K. G. McHuigan, y P. Fernández-Ibáñez. 2019. “Microbiological Evaluation of 5 L- And 20 L-Transparent Polypropylene Buckets for Solar Water Disinfection (SODIS)”. *Molecules* 24 (11): 2411–2193. DOI: 10.3390/molecules24112193
- Porley, V., E. Chatzisyneon, B. C. Meikap, S. Ghosal, y N. Robertson. 2020. “Field Testing of Low-Cost Titania-Based Photocatalysts for Enhanced Solar Disinfection (SODIS) in Rural India”. *Environmental Science: Water Research and Technology* 6 (3): 809–16. DOI: 10.1039/c9ew01023h
- Qian, Y., Y. Hu, Y. Chen, D. An, P. Westerhoff, D. Hanigan, y W. Chu. 2020. “Haloacetonitriles and Haloacetamides Precursors in Filter Backwash and Sedimentation Sludge Water during Drinking Water Treatment”. *Water Research* 186: 116346. DOI: 10.1016/j.watres.2020.116346
- Rogers, E., H. Tappis, S. Doocy, K. Martínez, N. Villeminot, A. Suk, D. Kumar, S. Pietzsch, y C. Puett. 2019. “Costs and Cost-Effectiveness of Three Point-of-Use Water Treatment Technologies Added to Community-Based Treatment of Severe Acute Malnutrition in Sindh Province, Pakistan”. *Global Health Action* 12 (1): 1568827. DOI: 10.1080/16549716.2019.1568827
- Roshith, M., A. Pathak, A. K. Nanda Kumar, G. Anantharaj, V. Saranyan, S. Ramasubramanian, T. G. Satheesh Babu, y D. V. Ravi Kumar. 2021. “Continuous Flow Solar Photocatalytic Disinfection of E. Coli Using Red Phosphorus Immobilized Capillaries as Optofluidic Reactors”. *Applied Surface Science* 540 (2): 148398. DOI: 10.1016/j.apsusc.2020.148398
- Samy, M., M. G. Ibrahim, M. Gar Alalm, M. Fujii, S. Ookawara, y T. Ohno. 2020. “Photocatalytic Degradation of Trimethoprim Using S-TiO<sub>2</sub> and Ru/WO<sub>3</sub>/ZrO<sub>2</sub> Immobilized on Reusable Fixed Plates.” *Journal of Water Process Engineering* 33: 3–10. DOI: 10.1016/j.jwpe.2019.101023.
- Schmid, P., M. Kohler, R. Meierhofer, S. Luzi, y M. Wegelin. 2008. “Does the Reuse of PET Bottles during Solar Water Disinfection Pose a Health Risk Due to the Migration of Plasticisers and Other Chemicals into the Water?” *Water Research* 42 (20): 5054–60. DOI: 10.1016/j.watres.2008.09.025
- Serrà, A., L. Philippe, F. Perreault, y S. Garcia-Segura. 2021. “Photocatalytic Treatment of Natural Waters. Reality or Hype? The Case of Cyanotoxins Remediation”. *Water Research* 188: 116543. DOI: 10.1016/j.watres.2020.116543
- Sraw, A., T. Kaur, Y. Pandey, A. Sobti, R. K. Wanchoo, y A. Pal Toor. 2018. “Fixed Bed Recirculation Type Photocatalytic Reactor with TiO<sub>2</sub> Immobilized Clay Beads for the Degradation of Pesticide Polluted Water.” *Journal of Environmental Chemical Engineering* 6 (6): 7035–43. DOI: 10.1016/j.jece.2018.10.062.
- Sreeja, S., y V. Shetty. 2017. “Photocatalytic Water Disinfection under Solar Irradiation by Ag@TiO<sub>2</sub> Core-Shell Structured Nanoparticles”. *Solar Energy* 157: 236–43. DOI: 10.1016/j.solener.2017.07.057
- Strauss, A., B. Reyneke, M. Waso, y W. Khan. 2018. “Compound Parabolic Collector Solar Disin-

- fection System for the Treatment of Harvested Rainwater". *Environmental Science: Water Research and Technology* 4 (7): 976–91. DOI: 10.1039/c8ew00152a
- Su, Z., S. Gu, y K. Vafai. 2017. "Modeling and Simulation of Ray Tracing for Compound Parabolic Thermal Solar Collector". *International Communications in Heat and Mass Transfer* 87: 169–74. DOI: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2017.06.021
- Sun, J., X. Wang, J. Sun, R. Sun, S. Sun, y L. Qiao. 2006. "Photocatalytic Degradation and Kinetics of Orange G Using Nano-Sized Sn(IV)/TiO<sub>2</sub>/AC Photocatalyst". *Journal of Molecular Catalysis A: Chemical* 260 (1–2): 241–46. DOI: 10.1016/j.molcata.2006.07.033
- Tanveer, M., y G. T. Guyer. 2013. "Solar Assisted Photo Degradation of Wastewater by Compound Parabolic Collectors: Review of Design and Operational Parameters". *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 24: 534–43. DOI: 10.1016/j.rser.2013.03.053
- Tian, M., Y. Su, H. Zheng, G. Pei, y G. Li. 2018. "A Review on the Recent Research Progress in the Compound Parabolic Concentrator (CPC) for Solar Energy Applications". *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 82: 1272–96. DOI: 10.1016/j.rser.2017.09.050
- Ubomba-Jaswa, E., P. Fernández-Ibáñez, C. Navtoft, M. I. Polo-López, y K. G. McGuigana. 2010. "Investigating the Microbial Inactivation Efficiency of a 25 L Batch Solar Disinfection (SODIS) Reactor Enhanced with a Compound Parabolic Collector (CPC) for Household Use". *Journal of Chemical Technology and Biotechnology* 85 (8): 1028–37. DOI: 10.1002/jctb.2398
- Vorontsov, A. V. 2019. "Advancing Fenton and Photo-Fenton Water Treatment through the Catalyst Design". *Journal of Hazardous Materials*, 103–12. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2018.04.033
- Wang, W. Y., y Y. Ku. 2007. "Effect of Solution PH on the Adsorption and Photocatalytic Reaction Behaviors of Dyes Using TiO<sub>2</sub> and Nafion-Coated TiO<sub>2</sub>". *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects* 302 (1–3): 261–68. DOI: 10.1016/j.colsurfa.2007.02.037
- Westall, F., y A. Brack. 2018. "The Importance of Water for Life". *Space Science Reviews* 214 (2): 1–23. DOI: 10.1007/s11214-018-0476-7
- Xing, Z., J. Zhang, J. Cui, J. Yin, T. Zhao, J. Kuang, Z. Xiu, N. Wan, y W. Zhou. 2018. "Recent Advances in Floating TiO<sub>2</sub>-Based Photocatalysts for Environmental Application." *Applied Catalysis B: Environmental*. 225 (6): 452–467. DOI: 10.1016/j.apcatb.2017.12.005
- Xu, D., y M. Qu. 2013. "Compound Parabolic Concentrators in Solar Thermal Applications: A Review". *ASME 2013 7th Int. Conf. on Energy Sustainability Collocated with the ASME 2013 Heat Transfer Summer Conf. and the ASME 2013 11th Int. Conf. on Fuel Cell Science, Engineering and Technology, ES 2013*, 1–10. DOI: 10.1115/ES2013-18409
- Yuan, G., Z. Wang, H. Li, y X. Li. 2011. "Experimental Study of a Solar Desalination System Based on Humidification-Dehumidification Process". *Desalination* 277 (1–3): 92–98. DOI: 10.1016/j.desal.2011.04.002
- Zhang, T., G. Pan, y Q. Zhou. 2016. "Temperature Effect on Photolysis Decomposing of Perfluorooctanoic Acid". *Journal of Environmental Sciences (China)* 42: 126–33. DOI: 10.1016/j.jes.2015.05.008
- Zhang, Y., M. Sivakumar, S. Yang, K. Enever, y M. Ramezani-pour. 2018. "Application of Solar Energy in Water Treatment Processes: A Review". *Desalination* 428 (11): 116–45. DOI: 10.1016/j.desal.2017.11.020
- Zhang, Y., y M. Sillanpää. 2020. "Modification of

Photocatalyst with Enhanced Photocatalytic Activity for Water Treatment”. En *Advanced Water Treatment: Advanced Oxidation Processes*. Sillanpää M. (ed). Amsterdam: Elsevier. DOI: 10.1016/B978-0-12-819225-2.00005-3