

EVALUACIÓN DE UN SISTEMA DE FOTOCATÁLISIS HETEROGÉNEA Y PASTEURIZACIÓN PARA DESINFECCIÓN DE AGUAS LLUVIAS

EVALUATION OF A HETEROGENEOUS PHOTOCATALYSIS AND PASTEURIZATION SYSTEM FOR RAINWATER DISINFECTION

Angie Catherin Quintero Agudelo^{*}
Camilo Andrés Vargas Terranova^{**}
Juan Pablo Sanabria Alcantar^{***}

Fecha de recepción: 21 de octubre de 2016

Fecha de revisión: 9 de abril de 2017

Fecha de aprobación: 4 de julio de 2017

Cómo citar: A. C. Quintero Agudelo, C. A. Vargas Terranova y J. P. Sanabria Alcantar, "Evaluación de un sistema de fotocatalisis heterogénea y pasteurización para desinfección de aguas lluvias," *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, vol. 28, no. 1, pp. 117-134. DOI: <http://dx.doi.org/10.18359/rcin.2350>

RESUMEN

La fotocatalisis heterogénea y la pasteurización para la desinfección del agua se presentan como una alternativa de potencial implementación y operación, porque buscan el aprovechamiento de la radiación y la temperatura, y la hacen apta para emplearla en múltiples locaciones, principalmente donde existan fuentes de abastecimiento que presenten bajos niveles de turbiedad. Para verificar la efectividad de estas técnicas, se evaluó una unidad compuesta por un sistema de captación de aguas lluvias, un filtro lento de arena y un sistema de desinfección solar compuesto por fotocatalisis heterogénea, que emplea como catalizador dióxido de titanio (TiO₂) en forma de

* Ingeniera Ambiental y Sanitaria, Vigilancia Sanitaria. Trabaja en Subred Integrada de Servicios de Salud Centro Oriente E.S.E., Bogotá, Colombia. Correo electrónico: qangie32@unisalle.edu.co. ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9113-5685>

** Ingeniero Ambiental y Sanitario, magíster consultor ambiental, Quipus S.A., y profesor, Universidad de La Salle, Bogotá, Colombia. Correo electrónico: canvargas@unisalle.edu.co. ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-1926-7026>

*** Ingeniero Ambiental y Sanitario, Universidad de La Salle, y tecnólogo en Control Ambiental, Servicio Nacional de Aprendizaje (SENA). Bogotá, Colombia. Correo electrónico: sjuan25@unisalle.edu.co. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3309-1300>

anatasa 99 % en un lecho fijo, y pasteurización con un proceso de recirculación, en una comunidad ubicada en la zona sur de Bogotá. La caracterización del afluente mostró valores de turbiedad iguales a 3,29 UNT, pH de 6,4, alcalinidad de 2,5 mg CaCO₃ L⁻¹ dureza de 0,65 mg CaCO₃ L⁻¹ y presencia de coliformes identificados en placas de petrifilm. La eliminación de microorganismos se hizo efectiva en días con índices de radiación por encima de 4UV (longitudes de onda de 315-400 nm), estados del tiempo soleados o parcialmente nublados y valores de turbiedad de 4 UNT para cargas hidráulicas por debajo de 60 m³ m⁻²·d⁻¹. El efluente presentó efectividad próxima al 60 % en la remoción de turbiedad y 100 % en coliformes. Los resultados obtenidos permiten el uso del agua tratada en actividades complementarias, excluyendo el consumo humano.

Palabras clave: desinfección, fotocatalisis heterogénea, pasteurización, calidad del agua.

ABSTRACT

Heterogeneous photocatalysis and pasteurization for water disinfection, are presented as an alternative to potential implementation and operation, because they seek the use of radiation and temperature making it suitable for use in multiple locations, principally where there are sources of supply that low levels of turbidity. To verify the effectiveness of these techniques, we evaluated a composite unit of a rainwater harvesting system, a slow sand filter and a solar disinfection system composed of heterogeneous photocatalysis, which uses as a catalyst of titanium dioxide (TiO₂) in the form of anatase 99% in a fixed bed, and pasteurization with a recirculation process, in a community located in the South zone of Bogota. The characterization of the tributary showed turbidity values equal to 3.29 NTU, pH 6.4, alkalinity (CaCO₃) 2.5 mg L⁻¹ hardness of 0.65 mg CaCO₃ L⁻¹ and presence of coliforms identified in petrifilm plates. Elimination of microorganisms became valid on days with indices of radiation above 4UV (wavelengths of 315 - 400 nm), sunny or partially cloudy weather and values of Turbidity 4 NTU to hydraulic loads below 60 m³ m⁻²·d⁻¹. The effluent presented to the 60% effectiveness in the removal of turbidity and coliform 100%. The results obtained allow the use of the treated water in complementary activities excluding the human consumption.

Keywords: Disinfection, heterogeneous photocatalysis, pasteurization, water quality.



INTRODUCCION

La desinfección es un proceso importante dentro de un sistema de tratamiento de agua, independientemente de su fuente. Se busca a partir de ella la eliminación de microorganismos existentes que puedan causar enfermedades [1]. Estudios reali-

zados por la Organización Mundial de la Salud (OMS) han detectado altos niveles de coliformes totales y coliformes fecales en agua lluvia [2], lo que evidencia la necesidad de implementar procesos de tratamiento que sirvan como una alternativa de desinfección.

La fotocatalisis heterogénea, es una alternativa de desinfección solar, a partir de la absorción de longitudes de onda inferiores a 400 nm [3] y [4] en presencia de un catalizador [5]. La luz y el catalizador son necesarios para alcanzar o acelerar una reacción química con el objeto de formar radicales hidroxilo [6]-[9]. Este mecanismo de desinfección se basa en un fenómeno físico por el cual las ondas cortas de la radiación ultravioleta [3] producen una división entre la pared de la célula y la membrana de los microorganismos y los virus, lo cual deteriora su membrana celular e inhibe su reproducción [10], y esto genera su eliminación sin causar cambios fisicoquímicos que puedan alterar el agua tratada [3]

El catalizador más ampliamente usado es el dióxido de titanio (TiO_2), en forma de anatasa un 99 % y en forma de rutilo un 1 % [6]-[11]. El dióxido de titanio (TiO_2) no es tóxico ni genera subproductos cancerígenos [7] y entre sus propiedades ópticas se encuentra como una substancia con un índice de refracción alto, lo que permite reflejar la luz UV [4]. Fisicoquímicamente las aguas tratadas por fotocatalisis heterogénea incluyen de forma especial pH a diferentes rangos [5]-[12], variaciones de temperatura sin afectar significativamente la velocidad de las reacciones [10] y turbiedades no mayores a 5 UNT [3]. El ion inhibidor de mayor influencia es el fosfato, puesto que impide la adsorción de aminoácidos sobre las partículas de TiO_2 , los carbonatos y otras especies que pueden reaccionar con los radicales hidroxilo; de esta manera, compite con los microorganismos y reduce la eficiencia del fotocatalizador [13].

El uso de reactores de lecho fijo es común para reacciones catalíticas, ya que pone en contacto el catalizador con el reactante para que la reacción se produzca de manera idónea. En estos, las partículas dispuestas en un lecho a través del cual el fluido circula están inmovilizadas y, por tanto, en íntimo contacto unas con otras [14].

Otra de las múltiples aplicaciones de la desinfección solar es la pasteurización, conocida como Solar Water Disinfection (SODIS) [3]-[15], la cual se basa en un proceso térmico que consiste en elevar la temperatura del agua por un tiempo suficiente en contenedores preferiblemente de color negro, con lo cual se logra la absorción y conservación del calor proveniente de la radiación solar [3]. Se ha comprobado que un incremento de la temperatura tiene gran incidencia sobre todos los microorganismos; en general, la mayoría de las bacterias mueren aproximadamente a 65 °C en tiempo determinado de 30 minutos [3].

La participación de la luz solar en la eliminación de productos químicos de síntesis del ambiente está bien documentada en los muchos artículos publicados en los últimos años. [16]. Algunas investigaciones apuntan al tratamiento de aguas residuales industriales especialmente, y obtienen reducciones entre 6 y 46 % de la demanda química de oxígeno (DQO), la cual hace referencia a la cantidad de sustancias susceptibles a la oxidación de compuestos químicos presentes en el agua [17] y carbono orgánico total (COT), que determina la cantidad de carbono representativo dentro de un compuesto orgánico con porcentajes de degradación cercanos al 98 % [11].

La fotocatalisis es una tecnología que podría aportar soluciones innovadoras para la desinfección del agua. Así, por ejemplo, la aplicación de un sistema fotocatalítico después de un tratamiento físico como la filtración representa un acople con gran potencial para eliminar los microorganismos presentes en el agua [18].

En estimaciones sobre las concentraciones de SODIS con dióxido de titanio (TiO_2) correctas, se calcula que no existe diferencia significativa con valores entre 0,288, 0,5011 y 1,0073 mg/ml, puesto que hay eliminación de coliformes en cualquiera de los casos [13]. Sin embargo, diferentes autores atribuyen otras concentraciones mayores entre rangos como 2g L^{-1} y 1g L^{-1} en un reactor con lámparas de agitación y en 100 mg L^{-1} en reactores con radiación solar [15]. Es decir, las concentraciones varían dependiendo de la técnica empleada.

En el método SODIS convencional, la eliminación de microorganismos se realiza en más de una hora, mientras que en presencia del catalizador tarda tan solo unos pocos minutos [13]-[15]. Estos métodos de desinfección en general son mayormente empleados en zonas rurales por su bajo costo y su fácil implementación [19]. Empero, factores como la geografía, el estado del tiempo, el número de horas de exposición, el volumen y el material de los envases que contienen el agua, la turbiedad y el color son, entre otros, los parámetros que podrían interferir en una desinfección oportuna [3].

Las regiones más favorables para aplicar SODIS se ubican entre las latitudes 15°N y 35°N (así como 15°S y 35°S), la turbiedad del agua no debe exceder los 30 UNT, los recipientes empleados son botellas de polietileno de

tereftalato (PET) transparentes de hasta 2L y se deben exponer de 5 a 6 horas bajo un cielo soleado o ligeramente nublado desde las 9 a. m. hasta las 3 p. m., puesto que, cumpliendo estas condiciones, la eficacia de SODIS para la pasteurización es del 99,9 % [20]. No obstante, Castillo, López y Bandala [21] pronostican que la comunidad científica internacional continuará observando el desarrollo de la inversión en esta área, puesto que aún resulta insuficiente la investigación.

Lo anterior sirvió de base para diseñar, construir y evaluar un sistema de desinfección solar de agua con bajos niveles de turbiedad a partir de fotocatalisis heterogénea y pasteurización, para agua lluvia.

La determinación de microorganismos presentes en el agua, más específicamente coliformes totales o fecales, se realizó por medio de placas petrifilm, las cuales dan resultados confirmados entre 24 a 48 horas [22]

1. MATERIALES Y MÉTODOS

1.1 Fuente de captación

La fuente de abastecimiento del sistema de desinfección solar correspondió al agua lluvia. Para su tratamiento, se adecuaron instalaciones de una vivienda para su captura y conducción. Se caracterizaron como parámetros *in situ* turbiedad, pH, temperatura, conductividad y sólidos disueltos. El estudio se realizó entre las coordenadas geográficas $4^\circ 16' 57''$ y $4^\circ 23' 28''$ de latitud Norte y $74^\circ 10' 57''$ y $74^\circ 13' 23''$ longitud Oeste, según el meridiano de Greenwich.

También se valoraron, como se muestra en la Tabla 1, los parámetros acidez, alcalinidad, dureza, aluminio, hierro, nitritos, nitratos, fosfatos, fluoruros y sólidos suspendidos totales; a partir de muestreos puntuales, en respuesta a la resolución 2115 de 2007,¹ y condiciones idóneas de

preservación, custodia y transporte de muestras.

1.2. Diseño y construcción del sistema

Las unidades de tratamiento consideradas para el sistema propuesto se exponen en la Fig. 1

Tabla 1. Caracterización inicial del agua lluvia en la zona de estudio

Parámetro	Unidad	Valor
pH	Unidades	6,4
Temperatura	(°C)	16,54
Conductividad	(ms/cm)	0,08
Sólidos Disueltos	(ppm)	0,04
Turbiedad	(UNT)	3,29
Acidez	(mg L ⁻¹)	2
Alcalinidad	(mg CaCO ₃ L ⁻¹)	2,5
Dureza	(mg CaCO ₃ L ⁻¹)	0,65
Nitratos	(mg L ⁻¹)	0,4
Nitritos	(mg L ⁻¹)	0,1
Fosfatos	(mg L ⁻¹)	0,85
Aluminio	(mg L ⁻¹)	0,025
Fluoruros	(mg L ⁻¹)	0,55
Cloruros	(mg L ⁻¹)	0,2

Fuente: elaboración propia.

1 Resolución 2115 de 2007 del Ministerio de la Protección Social y Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, por medio de la cual se señalan características, instrumentos básicos y frecuencias del sistema de control y vigilancia para la calidad del agua para consumo humano.

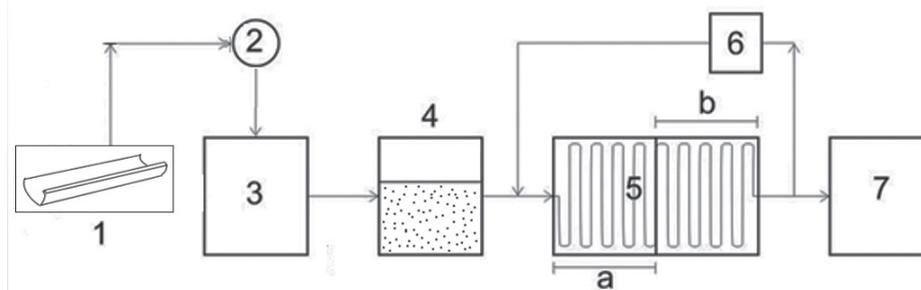


Fig. 1. Diagrama de flujo del sistema: 1) canales de captación de agua lluvia; 2) tanque interceptor de primeras aguas; 3) tanque de almacenamiento de agua lluvia; 4) filtro lento de lechos áridos; 5) sistema de desinfección solar, a) fotocatalisis heterogénea y b) pasteurización; 6) sistema de recirculación; 7) tanque de distribución final.

Fuente: elaboración propia.

1.2.1. Captación de aguas lluvia

Para estimar las necesidades de captación y almacenamiento del efluente, primero se calcularon los valores de precipitación promedio completando los registros faltantes por el método aritmético [23], con base en información de las estaciones meteorológicas y pluviométricas más cercanas a la zona, pertenecientes al Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia (Ideam).

El proceso de cálculo y diseño respondió a la metodología definida por el Centro Pa-

namericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (Cepis) [24]. Con esto se obtuvo el volumen del tanque de almacenamiento, un tanque interceptor de primeras aguas y el porcentaje de la demanda mensual por abastecer.

El tejado que recoge el agua lluvia es de material zinc; las canales, de aluminio; los tanques de almacenamiento e interceptor son comerciales y de plástico. La tubería del sistema es totalmente de PVC con diámetros de $\frac{3}{4}$ " y $\frac{1}{2}$ " (ver Fig. 2).



Fig. 2 Collage visualización del tratamiento

Fuente: elaboración propia.

1.2.2. Filtro lento de lechos áridos

Entendiendo las necesidades para el tratamiento asociadas a niveles bajos de turbiedad, se diseñó un filtro con lechos áridos de grava fina (3 mm) y arena (1mm) que retienen partículas [25], y se compró a la empresa FiltraH2o Ltda. La capacidad instalada del filtro se determinó aforando el caudal máximo de operación, por el método volumétrico [26] y fue regulado por medio de una válvula de bola de ½”.

1.2.3. Desinfección solar por fotocatalisis heterogénea y pasteurización

Para la construcción e implementación de las unidades de fotocatalisis heterogénea y pasteurización se definieron su geometría y óptica [27]. La geometría respondió a una inclinación de 5° en dirección Oriente-Occiden-

te, teniendo en cuenta la posición del Sol y la latitud en la zona, y así favorecer la radiación efectiva sobre la unidad en dicha dirección. En investigaciones para sistemas que emplean TiO_2 en suspensión, la sedimentación del catalizador a lo largo del circuito hidráulico debe evitarse, por lo que se recomiendan diámetros entre 25 y 50 mm [28]. Sin embargo, en este caso el diámetro [27] se fijó experimentalmente en 20 mm para evitar problemas con la absorbancia del TiO_2 , que impiden que la radiación llegue completa a la parte interna del tubo, puesto que se planteó un sistema de lecho fijo.

La óptica se manejó a partir de la implementación de vidrio tipo Pyrex, con buenas garantías de transmitancia (Fig. 3) e importante captura de rayos UV; así, se mantuvieron las necesidades para la reacción fotocatalítica para radiación cuya longitud de onda sea menor a 400 nm [3], [4].

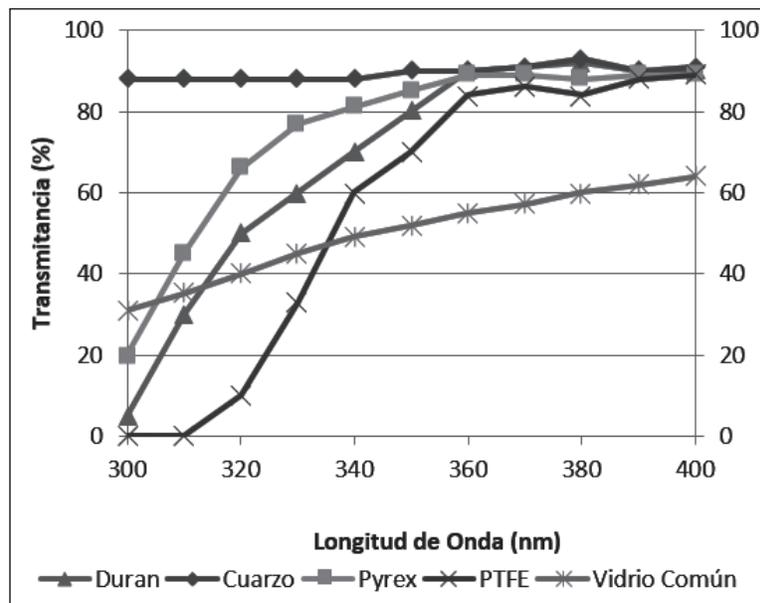


Fig. 3. Diferencia transmitancia entre diferentes tipos de vidrios.

Fuente: elaboración propia.

En la pasteurización se implantó tubería en PVC de $\frac{3}{4}$ " negro para aumentar la temperatura del agua a partir de la absorción de calor.

Estos dos tipos de desinfección solar se situaron sobre una base de aluminio compuesta por cinco tubos de vidrio Pyrex para la fotocatalisis heterogénea y cinco tubos de PVC negros para la pasteurización.

2. CATALIZADOR

El catalizador empleado fue Dióxido de Titanio en forma de anatasa 99 % (TiO_2)², dispuesto a modo de esferas entrelazadas de masilla epoxica (10-15 mm de diámetro) recubiertas con TiO_2 como lecho fijo al interior de los tubos de vidrio Pyrex (Fig. 4).

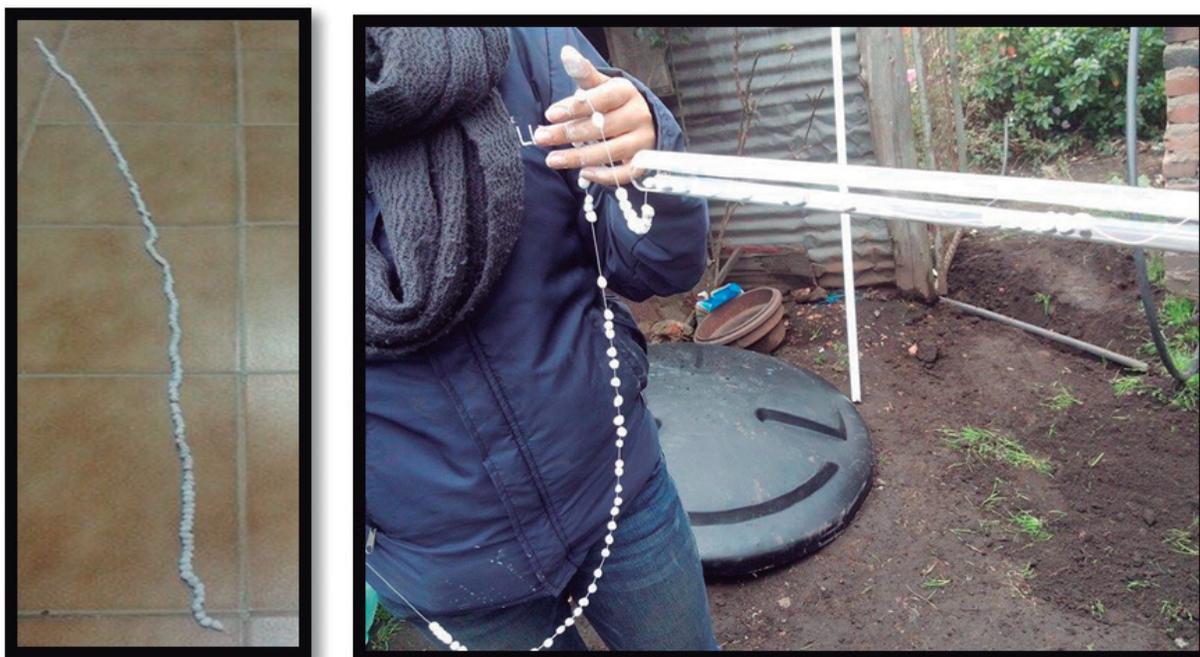


Fig. 4. Implementación de TiO_2 en lecho fijo dentro de tubo de vidrio Pyrex

Fuente: elaboración propia.

3. VARIABLES DE EVALUACIÓN

Se tomaron muestras concretas en el afluente y en el efluente. Posterior a esto, se hizo un análisis de laboratorio en el Centro Tecnológico de Ambiente y Sostenibilidad de la Universidad de La Salle de características físicas, químicas y microbiológicas, teniendo en cuenta las mismas consideraciones del numeral 1.1.

Las principales variables que influyen en la desinfección se presentan en la Tabla 2. De acuerdo con estas, se estableció el número de muestreos y de muestras por realizar.

2 Proveedor del TiO_2 : MERCK.

Tabla 2. Número de muestreos

Parametro	Número de semanas	Veces por semana	Veces al día	Hora	Número total de muestras
Turbiedad	4	2	3	08:30 a. m.	24
Carga Hidráulica	4	2	3	11:00 a. m.	
Temperatura	4	2	3	02:00 p. m.	
Índice de radiación	4	2	3		
Coliformes	5	1	2	08:30 a. m.	10
				02:00 p. m.	

Fuente: elaboración propia.

El número total de muestras se determinó teniendo en cuenta la variabilidad climática de la zona.

4. EVALUACIÓN DEL SISTEMA

Se comprobó la influencia de las variables que se presentan en la Tabla 3, siguiendo el comportamiento de la turbiedad en la entrada, en la filtración y en la desinfección en términos de la carga hidráulica. Se emplearon dos cargas hidráulicas diferentes durante esta etapa, una correspondiente al caudal máximo de operación, es decir, el flujo de agua que pasa por el sistema cuando la válvula reguladora está abierta en su totalidad, y otra que se encuentra dentro del rango de tasas de filtración recomendadas para filtros lentos (2,4-7,2 m³/m².dia) [29].

La presencia o ausencia de coliformes, la temperatura y el índice de radiación también son variables en función de la carga hidráulica. Sin embargo, se estudió el comportamiento de la incidencia de la radiación y la temperatura en la eliminación de microorganismos; asimismo, la influencia de la turbiedad en el paso de la radiación dentro del sistema de fotocátalisis heterogénea.

Las mediciones *in situ* fueron realizadas para obtener estados del tiempo aleatorios y estudiar la incidencia en la desinfección de acuerdo con el comportamiento de las variables mencionadas. Se verificó el cumplimiento de la resolución 2115 de 2007 de los parámetros señalados en el numeral 1.1. En la Tabla 3 se presentan las mediciones realizadas y los métodos empleados.

Tabla 3. Parámetros de medición

Parámetros	Equipo	Método	Descripción
Turbiedad	Turbidímetro	Método nefelométrico	Método 2130 B Standard Methods
Temperatura	Multiparametro	-	Método 2550 B Standard Methods
Coliformes totales	Placas de Petrifilm	Presencia o ausencia	Certificado de placas de recuento de coliformes No. 2006021761 por Invima
Caudal	Cronometro y probeta	Volumétrico	-
Radiación	Aplicación World UV	Mide los niveles de radiación UV	Lanzada por la Asociación Británica de Dermatólogos

Fuente: elaboración propia.

Al obtener el índice de radiación se determina la longitud de onda correspondiente (ver Tabla 4).

Tabla 4. Longitud de onda correspondiente a cada índice UV

Índice uv	Longitud de onda (nm)
$8 \geq 11$	400 - 315
03-07	315 - 280
01-02	280 - 100

Fuente: elaboración propia.

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1 Comportamiento de variables de evaluación

La operación y medición del sistema se realizó aleatoriamente dos días a la semana durante un mes, para obtener diferentes condiciones climáticas y meteorológicas; así, se tomaron ocho mediciones *in situ* y dos ex

situ. Se describe a continuación la evaluación de los parámetros muestreados.

5.1.1. Turbiedad

La Fig. 5 presenta las mediciones de turbiedad para dos valores de carga hidráulica, a) $63,36 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ y b) $6,9 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$.

El comportamiento presentado durante los días seleccionados con carga hidráulica de $63,36 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ corresponde a un decremento con valores de turbiedad del 24 %, 30 % y 70 % en días cuando las condiciones meteorológicas favorecieron el almacenamiento de agua pluvial por presencia de precipitaciones. No obstante, en días cuando la precipitación fue escasa, el lecho filtrante se saturó y generó arrastre de material y de esta

manera aumentó la turbiedad, debido a que hubo bajos volúmenes de agua para operar el sistema, hecho que implicó la intermitencia en el paso del fluido. La Fig. 5 a) muestra que la oferta de lluvia es directamente proporcional a la reducción de la turbiedad. Esta influencia se ve reflejada en el cumplimiento o no del umbral definido por la norma para el parámetro (resolución 2115 de 2007; valor máximo permitido para turbiedad 2 UNT).

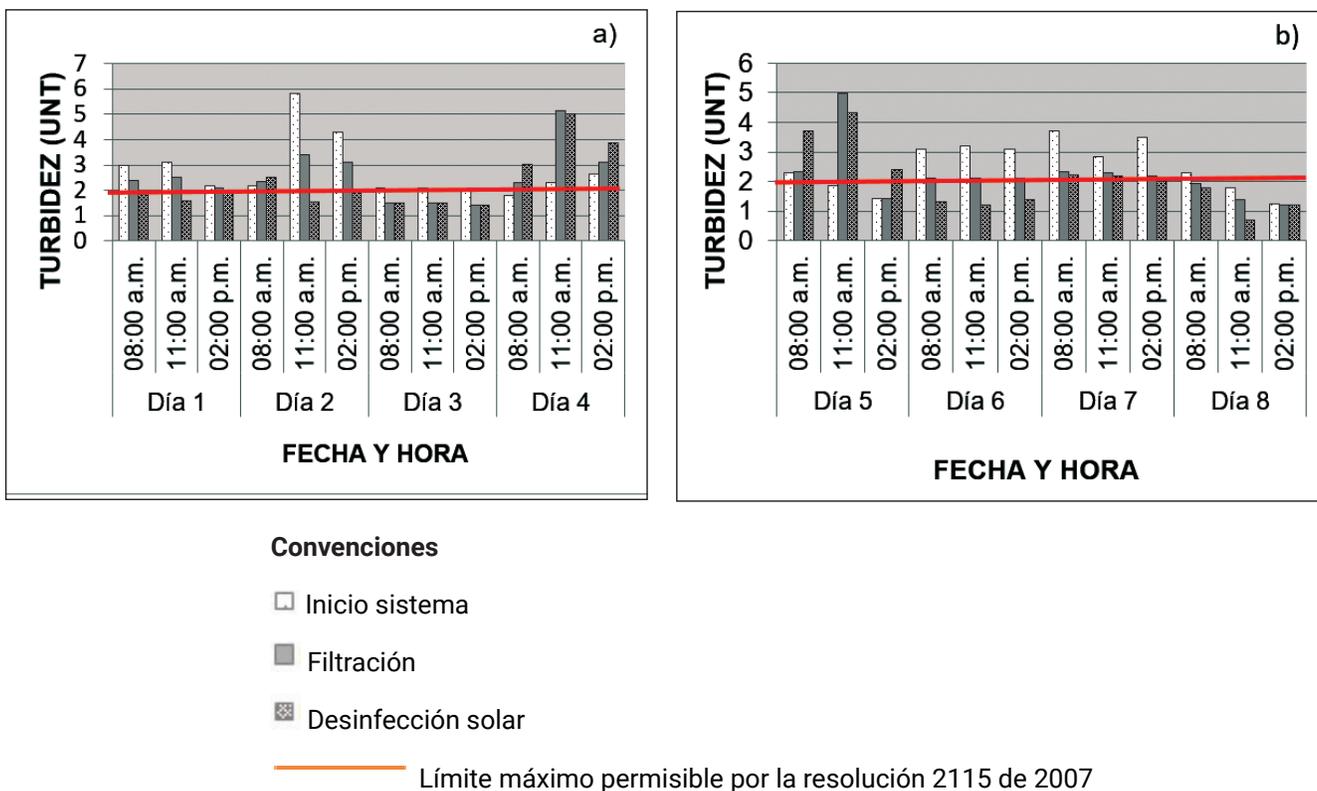


Fig. 5. Comportamiento de la turbiedad con una carga hidráulica de a) $63,36 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{-d}$ y b) $6,9 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{-d}$
Fuente: elaboración propia.

La Fig. 5 b) presenta el comportamiento de la turbiedad en el sistema cuando es operado con carga hidráulica $6,9 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{-d}$. Se observa una tendencia similar a la de la Fig. 5 a) cuando el sistema funciona en condiciones de bajas precipitaciones. Sin embargo,

la mayoría de los días se presentaron reducciones de hasta el 45 %, debido a que el flujo del agua obtuvo mayor tiempo de retención. Este comportamiento se relaciona con que la carga hidráulica fue menor (se encontraba dentro del rango de tasas de filtración para

filtros lentos). Por tanto, operar sistemas de este tipo con cargas hidráulicas bajas ofrece remoción de turbiedad, mejora la eficiencia de la filtración y cumple con la normatividad para agua potable.

5.1.2. Coliformes

La Tabla 5 relaciona la presencia o ausencia de coliformes con respecto al índice de radiación y el estado del tiempo al momento del muestreo. Los días que presentaron precipitaciones tuvieron menor incidencia de la radiación y mostraron presencia de coliformes. Bajo entornos nubosos también se

observa ausencia de desinfección. Sin embargo, condiciones soleadas y parcialmente soleadas son favorables para la eliminación de microorganismos, con índices de radiación UV entre 4 y 13 o longitudes de onda entre los 280 y 400 nm. No obstante, el estudio de DMA Alrousen presenta la evaluación de un sistema de fotocátalisis heterogénea con TiO₂ recubierto en los tubos en donde se evidenció desinfección en condiciones de nubosidad [30].

Los días 9 y 11 muestran eliminación de coliformes a las 8:00 a. m. desde la filtración, lo que manifiesta la posibilidad de eliminar microorganismos desde esta unidad.

Tabla 5. Comportamiento de coliformes en presencia de la radiación

Punto de toma de muestra/hora	08:00 a. m.	02:00 p. m.								
Día	9		10		11		12		13	
Inicio sistema	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
Filtración	✓	×	×	×	✓	✓	×	×	×	×
Desinfección solar	✓	✓	×	✓	✓	✓	×	×	×	×
Índice (UV)	5	13	2	4	4	11	2	2	2	2
Estado del tiempo										

Convenciones

- Soleado
- Lluvioso
- Parcialmente soleado
- Llovizna
- Nublado
- × Presencia de coliformes
- ✓ Ausencia de coliformes

Fuente: elaboración propia.

5.1.3. Radiación y la temperatura

La Fig. 6 presenta los resultados de la eliminación de microorganismos con respecto al índice de radiación y turbiedad para fotocátalisis heterogénea, y temperatura para pasteurización.

La Fig. 6 a) muestra los valores del índice de radiación y de turbiedad con respecto a la desinfección. Los datos de radiación por debajo de 3UV indican en todos los casos presencia de coliformes, con turbiedad entre un rango de 1,2 a 3,0 UNT. Sin embargo, el valor de turbiedad más alto registrado en la desinfección fue de 4 UNT, en presencia de un índice de radiación de 4 UV con eliminación de coliformes. En síntesis, para obtener 100 % de eliminación de microorganismos, debe existir un índice de radiación mayor a 4 UV y turbiedad menor o igual a 4 UNT. Con lo anterior, se muestra que la mayor influencia en la desinfección por fotocátalisis heterogénea se debe a la radiación, desde que se cuente con valores de turbiedad por debajo de 4 UNT.

El Fig. 6 b) presenta los valores de temperatura alcanzados en el sistema de pasteurización, frente a la radiación y la presencia o ausencia de coliformes. De esta manera, se determina si la eliminación de microorganismos se debe a la fotocátalisis o a la pasteurización. La temperatura máxima alcanzada en los días aleatoriamente monitoreados fue de 24,2 °C, con una radiación de 13 UV o 400 nm y ausencia de coliformes. No obstante, se registró una temperatura mínima de 14,2°C con una radiación de 5 U.V. o 300 nm, y eliminación de coliformes en el agua. Esto muestra que al tener una temperatura baja y un índice de radiación por encima de 4 UV se presentó ausencia de coliformes. Si bien, la

mayoría de las bacterias mueren a 65 °C durante 30 minutos o 75 °C durante 15 minutos [3], dichas temperaturas no fueron alcanzadas y, por tanto, la radiación fue la variable con mayor incidencia en la desinfección.

De igual manera, se ha demostrado que para la desinfección este es un proceso óptimo, ya que impide la formación de compuestos halogenados que pueden ser peligrosos y tiene la capacidad de eliminar varios tipos de microorganismos, incluyendo bacterias Gram (+) y (-) [31].

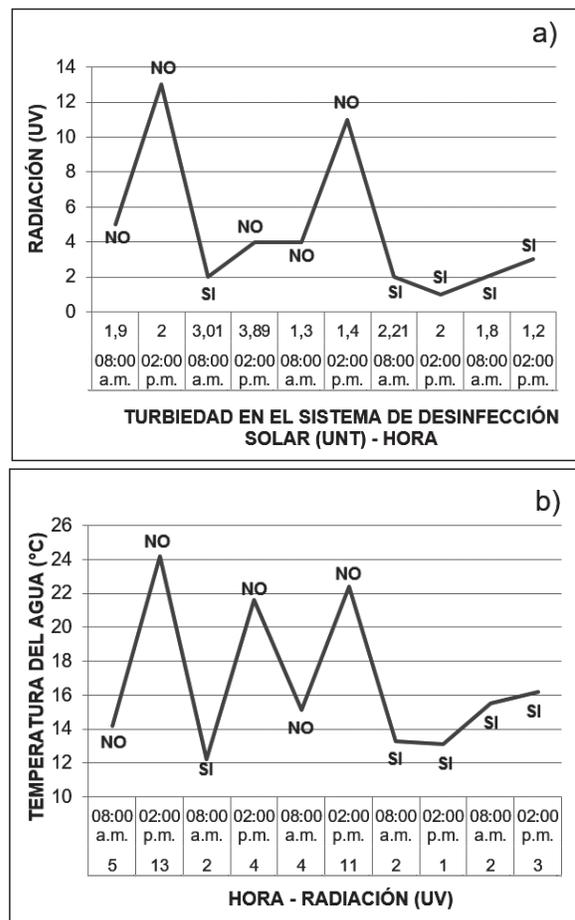


Fig. 6. a) influencia de la radiación y la turbiedad en la desinfección; b) influencia de la radiación y la temperatura en la desinfección: SI: presencia de coliformes, NO: ausencia de coliformes

Fuente: elaboración propia.

5.1.4. Caracterización del agua

La evaluación de los parámetros se hizo con dos cargas hidráulicas diferentes: 63,36 y 6,9m³/m²-d. Los datos de la carga hidráulica 63,36 m³/m²-d mostraron que el 70 % de

los parámetros medidos cumplió con los valores máximos permisibles, según la resolución 2115 del 2007, mientras que con 6,9m³/m²-d, se observa que el 100 % de los parámetros cumple (ver Tabla 6).

Tabla 6. Síntesis de caracterización. IS: inicio del sistema, DS: desinfección solar

Carga hidráulica		63,34 m ³ /m ² -d			6,9 m ³ /m ² -d			Cumplimiento de la resolución 2115 de 2007	
		08:00 a. m.	11:00 a. m.	02:00 p. m.	08:00 a. m.	11:00 a. m.	02:00 p. m.	Carga 1	Carga 2
pH	IS	5,85	6,32	6,54	5,9	5,63	5,76	-	-
	DS	5,61	6,24	6,73	5,4	5,52	5,7	-	-
Conductividad	IS	0,08	0,05	0,01	0,04	0,01	0,01	-	-
	DS	0,02	0,05	0,04	0,02	0,01	0,01	-	-
SD	IS	0,04	0,02	0,02	0,02	0,01	0,01	-	-
	DS	0,01	0,03	0,02	0,01	0,01	0	-	-
Temperatura	IS	11,1	12,6	15,9	10,8	12,3	12,1	-	-
	DS	12,2	21,8	21,6	15,5	12,3	16,2	-	-
Turbidez	IS	1,78	2,3	2,62	2,3	1,8	1,25	No cumple	Sí cumple
	DS	3,01	5,02	3,89	1,8	0,69	1,2	Sí cumple	Sí cumple
Presencia de Coliformes	IS	SI	-	SI	SI	-	SI	No cumple	No cumple
	DS	SI	-	NO	SI	-	SI	Sí cumple	No cumple
Dureza	IS	0,044	0,52	0,56	0,22	0,18	0,12	Sí cumple	Sí cumple
	DS	0,064	0,64	0,6	0,18	0,1	0,32	Sí cumple	Sí cumple
Aluminio	IS	0	0	0	0	0	0	Sí cumple	Sí cumple
	DS	0	0	0	0	0	0	Sí cumple	Sí cumple

Fuente: elaboración propia.

6. CONCLUSIONES

La implementación de un sistema de tratamiento constituido por filtración y desinfección solar por fotocátalisis heterogénea y pasteurización, para un afluyente producto de la captura de aguas lluvias, pudo contribuir a la carencia del recurso en una locación vulnerable del sur de Bogotá; no obstante, si se presenta el hecho de que en la localidad en la que se desea implementar el piloto no se cuenta con probabilidad alta de precipitación, se puede buscar una fuente de agua con bajos niveles de turbiedad para tratar, como se ha mencionado anteriormente; el sistema de tratamiento de fotocátalisis solo es efectivo si la turbiedad del agua es baja ya que, si fuera al contrario, los rayos ultravioleta no pueden actuar efectivamente con el catalizador dióxido de titanio.

Dadas las condiciones meteorológicas y climatológicas de la zona donde se implementó el proyecto, las variables más importantes fueron la carga hidráulica en función de la radiación, la turbiedad, la presencia de coliformes y la temperatura, variables que determinaron las unidades de captación de agua lluvia, tratamiento de filtración y desinfección solar, empleando materiales adecuados para cada una de las variables: carga hidráulica y turbiedad (Filtro lento de arena), radiación (vidrio Pyrex y base de aluminio), temperatura: (tubo negro y tapa en acrílico), coliformes (sistema de desinfección solar por fotocátalisis heterogénea con catalizador dióxido de titanio y pasteurización).

El proceso de análisis permitió evidenciar que en la filtración, a mayor carga hidráulica, menor eficiencia en cuanto a remoción de turbiedad, factor que influye en el paso de

la radiación. Asimismo, en los resultados de la influencia de la radiación y la turbiedad en la desinfección (presencia de coliformes), se observó que con índices de radiación que van desde los 4UV se presenta desinfección en el sistema de fotocátalisis heterogénea.

La evaluación del sistema de desinfección solar indica que no hubo ausencia de coliformes por la pasteurización, puesto que la temperatura ambiente de la zona no fue suficiente para elevar la temperatura del agua en el sistema, lo que indica que la desinfección se logró por la fotocátalisis heterogénea. Lo anterior basado en que este proceso causa daño celular por la generación de radicales OH en la superficie del fotocatalizador y por la absorción directa de la radiación UV por las células, lo que contribuye en gran medida a promover la inactivación celular.

AGRADECIMIENTOS

Gracias a Viviana Carvajal, por su colaboración en la construcción del proyecto; de igual manera a Liced Melo, Jairo Sarmiento, Eladio Guerrero y Fanny Guerrero, por el apoyo. También agradecemos el acompañamiento y la asesoría continua del ingeniero Julio Cesar Ramírez.

REFERENCIAS

- [1] L. De Vargas. *Manual I: Tratamiento de agua para consumo humano, plantas de filtración rápida*. Lima, Perú: Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente [CEPIS], Organización panamericana de la Salud [OPS], 2004.

- [2] L. D. Sánchez y E. Y. Caicedo, "Uso del agua lluvia en la Bocana – Buenaventura," en *Conf. Int. Usos Múltiples del Agua: para la Vida y el Desarrollo Sostenible*, Cali, Colombia, 2003.
- [3] F. Solsona y J. P. Méndez. *Desinfección del agua*. Lima, Perú: Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente [CEPIS], Organización panamericana de la Salud [OPS], 2002.
- [4] G. Sauthier, "Preparación y caracterización de capas delgadas y estructuras de óxido de titanio para aplicaciones fotovoltaicas activadas mediante radiación UV o visible," Tesis de doctorado, Facultad de Ciencias, Departamento de Química, Universidad Autónoma de Barcelona, Barcelona, 2012.
- [5] K. D. Caraballo, "Diseño, construcción y evaluación de un reactor fotocatalítica solar de placa plana para degradar ácido tereftálico," Tesis de pregrado, Facultad de Ingeniería, Universidad de Cartagena, Cartagena, 2012.
- [6] L. F. Garcés, E. A. Mejía y J. J. Santamaría, "La fotocatalisis como alternativa para el tratamiento de aguas residuales," *Revista Lasallista de investigación*, vol. 1, no. 1, pp. 83-92, 2004.
- [7] C. A. Castro, A. L. Arámbula, A. Centeno y S. A. Giraldo, "Degradación Heliofotocatalítica de *Escherichia coli* en Sistemas tipo Desinfección SODIS, con Dióxido de Titanio Modificado," *Información Tecnológica*, vol. 20, no. 6, pp. 29-36, 2009. DOI: <https://doi.org/10.4067/s0718-07642009000600005>
- [8] J. A. Arroyave y L. F. Garcés, "Evaluación de la degradación del pesticida Mertect empleando procesos avanzados de oxidación (PAO)," *Revista Producción + Limpia*, vol. 6, no. 2, pp. 9-18, 2007.
- [9] J. A. Arroyave, L. F. Garcés y A. F. Cruz, "Fotodegradación de las aguas residuales con pesticida Mertect en la industria bananera empleando Fotocatálisis con Dióxido de Titanio y Lámpara de Luz Ultravioleta," *Revista Lasallista de Investigación*, vol. 4, no. 1, pp. 8-9, 2007.
- [10] J. Blanco, S. Malato, C. A. Estrada, E. R. Bandala et al. "Purificación de Aguas por Fotocatálisis Heterogénea: Estado del Arte. Parte 1," 2014. [En línea]. Disponible en: <http://www.estrucplan.com.ar/Producciones/entrega.asp?IdEntrega=2958>.
- [11] F. F. Garcés, M. L. Hernández, G. A. Peñuela, A. Rodríguez y J. A. Salazar, "Degradación de aguas residuales de la industria textil por medio de fotocatalisis," *Revista Lasallista de investigación*, vol. 2, no. 1, pp. 15-18, 2005.
- [12] I. Restrepo, L. D. Sánchez, A. Galvis, J. Rojas e I. J. Sanabria. *Avances en investigación y desarrollo en agua y saneamiento*. Cali, Colombia: Editorial Primera, Universidad del Valle, 2007.
- [13] C. Gutiérrez, L. Robles, F. Ortiz y L. Martínez, "Desinfección foto-catalítica del agua para consumo humano usando luz solar y dióxido de titanio (TiO₂)

- inmovilizado, 2004. [En línea]. Disponible en: [http://www.elaguapotable.com/DESINFECCI%C3%93N%20FOTOCATAL%3%8DTICA%20DEL%20AGUA%20PARA%20CONSUMO%20HUMANO%20USANDO%20LUZ%20SOLAR%20Y%20DI%3%93XIDO%20DE%20TITANIO%20\(TiO2\)%20INMOVILIZADO.pdf](http://www.elaguapotable.com/DESINFECCI%C3%93N%20FOTOCATAL%3%8DTICA%20DEL%20AGUA%20PARA%20CONSUMO%20HUMANO%20USANDO%20LUZ%20SOLAR%20Y%20DI%3%93XIDO%20DE%20TITANIO%20(TiO2)%20INMOVILIZADO.pdf).
- [14] M. Iborra, J. Tejero y F. Cunill, "Apuntes: Reactores Multifásicos," 2013. [En línea]. Disponible en: <http://diposit.ub.edu/dspace/bitstream/2445/33262/1/APUNTES%20RM.pdf>
- [15] P. Fernández, "Desinfección con reactores solares: experiencia operativa," 2005. [En línea]. Disponible en: https://www.psa.es/es/projects/solarsafewater/documents/libro/16_Capitulo_16.pdf.
- [16] S. Malato, J. Blanco, D. Alarcón, M. Maldonado y P. Fernández, "Photocatalytic decontamination and disinfection of water with solar collectors," *Catalysis Today*, vol. 122, 2007, pp. 137–149. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2007.01.034>
- [17] G. M. Restrepo, L. A. Ríos, J. M. Marín, J. F. Montoya y J. A. Velázquez, "Evaluación del tratamiento fotocatalítico de aguas residuales industriales empleando energía solar," *Dyna*, vol. 75, no. 155, pp. 145-153, 2008.
- [18] A. Rincón, S. Giraldo y C. Pulgarín, "Desinfección de agua por fotocatalisis. Aspectos básicos," 2005. [En línea] Disponible en: https://www.psa.es/es/projects/solarsafewater/documents/libro/13_Capitulo_13.pdf
- [19] J. J. Hermosillo, "Agua potable para microcomunidades con energía solar," Renglones: *Revista del ITESO*, vol. 1, no. 49, pp. 85-91, 2001.
- [20] R. Meierhofe y M. Wegelin, "Guía de aplicación: Desinfección solar del agua," 2003. [En línea]. Disponible en: http://www.sodis.ch/methode/anwendung/ausbildungsmaterial/dokumente_material/manual_s.pdf.
- [21] J. H. Castillo, A. López y E. R. Bandala, "Desinfección de agua mediante el uso de tecnologías emergentes basadas en procesos avanzados de oxidación," *Revista Temas selectos de Ingeniería de alimentos*, vol. 4, no. 1, pp. 74-83, 2010.
- [22] 3M, "Placas 3M™ Petrifilm™ E. coli/Coliformes," 2016. [En línea]. Disponible en: http://solutions.productos3m.es/wps/portal/3M/es_ES/FoodSafetyEU/FoodSafety/ProductInformation/ProductCatalogue/?PC_Z7_RJH9U52300DK40IMRSPA7P2065000000_nid=C0WJ62882Vbe8SD7TQV1GLgl
- [23] J. M. Preciado, Z. R. Mejía y J. M. Arganis, "Análisis y aplicación de métodos temporales para completar registros faltantes de lluvia en la cuenca del río Bolaños," en *V Congr. Int. De meteorología de la OMMAC*, Acapulco, México, 2011.
- [24] Organización panamericana de la Salud [OPS], Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente [CEPIS], "Guía de diseño para captación del agua lluvia," 2004. [En línea]. Disponible en: <http://www.bvsde.ops-oms.org/bvsacd/cd47/lluvia.pdf>

- [25] R. Riera, "Filtro Arena 20", 36" y 48," 2006. [En línea]. Disponible en: https://www.uclm.es/area/ing_rural/Catalogos/HidraulicaRiegos/RegaberFiltroArena.pdf
- [26] C. Torres, "Procedimiento para la prueba de aforo volumétrico," 2006. [En línea]. Disponible en: <http://www.utp.ac.pa/documentos/2011/pdf/PCUTP-CIHH-AH-103-2006.pdf>
- [27] Y. L. Ramírez, "Diseño, construcción y puesta en marcha de un reactor tubular fotocatalítica (UV-A) para la degradación de desechos químicos orgánicos," Tesis de pregrado, Facultad de Tecnologías, Universidad tecnológica de Pereira, Pereira, 2013.
- [28] S. Malato, J. Blanco, R. Maldonado, P. Fernández et al., "Engineering of solar photocatalytic collectors," *Solar Energy*, vol. 77, no. 5, 2004, pp.513-524. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.soler.2004.03.020>
- [29] J. A. Romero. *Purificación del Agua*. Bogotá, Colombia: Escuela Colombiana de Ingeniería, 2006.
- [30] D. Alrousan, M. López, P. Dunlop y P. Fernández, "Solar photocatalytic disinfection of water with immobilised titanium dioxide in re-circulating flow CPC reactors," *Applied Catalysis B: Environmental*, vol. 128, pp. 126-134, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2012.07.038>
- [31] G. X. Velásquez, "Remoción de coliformes fecales en aguas residuales generadas en una granja avícola, utilizando fotocatalisis heterogénea como una alternativa," Tesis de pregrado, Facultad de Ingeniería Química, Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala, 2016.