



**BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA**



**Instituto de Ciencias**

**POSGRADO EN CIENCIAS AMBIENTALES**

*“La Tierra no es de nosotros, nosotros somos de la Tierra”*

**Tratamientos fotoquímicos (UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, UV/O<sub>3</sub> y UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/O<sub>3</sub>) y de ósmosis inversa en aguas residuales**

Tesis

Que para obtener el grado de:

**MAESTRA EN CIENCIAS AMBIENTALES**

Presenta:

**María de los Ángeles Amaro Soriano**

Director de tesis:

**Dr. José Antonio Rivera Tapia**

Enero 2022



**BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA**



**Instituto de Ciencias**

**POSGRADO EN CIENCIAS AMBIENTALES**

*“La Tierra no es de nosotros, nosotros somos de la Tierra”*

**Tratamientos fotoquímicos (UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, UV/O<sub>3</sub> y UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/O<sub>3</sub>) y de ósmosis inversa en aguas residuales**

Tesis

Que para obtener el grado de:

**MAESTRA EN CIENCIAS AMBIENTALES**

Presenta:

**María de los Ángeles Amaro Soriano**

Comité tutorial:

Director	Dr. José Antonio Rivera Tapia
Tutora	Dra. María Lilia Cedillo Ramírez
Integrante Comité Tutorial	Dr. Manuel Huerta Lara
Integrante Comité Tutorial	Dr. José Víctor Rosendo Tamariz Flores

Enero 2022

## **DEDICATORIA**

En memoria de mi abuelita, por sus consejos y amor,  
por ser el ángel que me guía y un ejemplo de vida.

En memoria del Dr. Fernando Hernández Aldana, por  
sentar las bases y ser el principal cimiento para la  
construcción de este trabajo.

A mi madre, por su educación, consejos, sacrificios y  
apoyo incondicional, por siempre impulsarme a ser  
mejor y lograr mis objetivos.

A mis amigos, por brindarme su apoyo en los  
momentos difíciles y de alegría, por siempre estar  
presentes y por su valiosa amistad.

# AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca de Maestría otorgada para el curso de mis estudios de posgrado.

CVU: 990199

Se agradece a la Vicerrectoría de Investigación y Estudios de Posgrado por el apoyo otorgado para la conclusión de esta tesis dentro del Programa IV. Investigación y Posgrado. Apoyar a los programas de posgrado para lograr su incorporación al Padrón Nacional de Calidad. Indicador establecido en el Plan de Desarrollo Institucional 2017-2021.

Al posgrado en Ciencias Ambientales del Instituto de Ciencias de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla por el apoyo brindado durante estos años y para la conclusión de esta tesis.

Al Dr. José Antonio Rivera Tapia, por todo el apoyo e interés brindado durante la realización de esta tesis, gracias por brindarme su confianza.

A la Dra. Gladys Linares Fleites, por su apoyo incondicional, su paciencia y las horas dedicadas para la realización de este trabajo de tesis, gracias por su confianza.

A la Dra. Laura Morales Lara y al Dr. Ricardo Darío Peña Moreno por su apoyo constante para la finalización del trabajo de tesis.

Al comité tutorial

Dra. María Lilia Cedillo Ramírez

Dr. Manuel Huerta Lara

Dr. José Víctor Rosendo Tamariz Flores

Por su apoyo para la elaboración de esta tesis.

## Índice

LISTA DE TABLAS.....	6
LISTA DE FIGURAS .....	7
ABSTRACT .....	9
I. INTRODUCCIÓN .....	10
II. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	12
III. JUSTIFICACIÓN.....	13
IV. PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN .....	14
V. HIPÓTESIS.....	14
VI. OBJETIVOS .....	15
6.1. Objetivo General.....	15
6.2. Objetivos específicos.....	15
VII. MARCO TEORICO .....	16
7.1. Contaminación del agua.....	16
7.1.1. Tratamiento de agua residual .....	20
7.1.2. Procesos de oxidación avanzada .....	21
7.1.3. Procesos Fotoquímicos.....	23
7.1.4. Ósmosis inversa.....	25
VII. MARCO CONTEXTUAL .....	26
7.2. El agua en México y Puebla.....	26
7.2.1. Relación sociedad – Medio ambiente .....	30
7.2.2. Marco legal.....	31
VII. MARCO METODOLÓGICO .....	34
7.3. Revisiones sistemáticas.....	34
7.3.1. Metodología en las revisiones sistemáticas .....	36
7.4. Aspectos teóricos del muestreo incidental o crítico .....	38
VIII. Materiales y Métodos .....	40
a) <i>Formulación del problema</i> .....	40
b) <i>Identificación de conceptos y términos de búsqueda</i> .....	40
b.1 <i>Procedimiento de búsqueda bibliográfica</i> .....	40
c) <i>Extracción de los datos</i> .....	41
d) <i>Evaluación de la calidad de los estudios incluidos</i> .....	42
e) <i>Análisis estadístico</i> .....	44
8.1. <i>Opinión de expertos en aguas residuales</i> .....	45

<b>IX. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....</b>	<b>47</b>
<b>9.1. (c) Selección bibliográfica .....</b>	<b>47</b>
<b>9.1.1. (d) Análisis bibliográfico .....</b>	<b>48</b>
<b>9.1.2. (d) Evaluación de la calidad de los estudios incluidos .....</b>	<b>53</b>
<b>9.2. (e) Análisis estadístico.....</b>	<b>63</b>
<b>9.3. Opinión de expertos en descontaminación de agua residual .....</b>	<b>71</b>
<b>X. Perspectiva en las ciencias ambientales.....</b>	<b>1</b>
<b>XI. CONCLUSIONES .....</b>	<b>3</b>
<b>XII. REFERENCIAS: .....</b>	<b>5</b>
<b>ANEXO 1.....</b>	<b>20</b>
<b>(A) Los expertos en consulta.....</b>	<b>20</b>
<b>(B) Entrevistas a expertos:.....</b>	<b>21</b>
<b>ANEXO 2.....</b>	<b>22</b>
<b>a) Referencias bibliográficas utilizadas en la revisión sistemática .....</b>	<b>22</b>

## LISTA DE TABLAS

<b>Tabla 1. Clasificación de los Procesos de Oxidación Avanzada.....</b>	<b>22</b>
<b>Tabla 2. Límites permisibles de calidad del agua.....</b>	<b>32</b>
<b>Tabla 3. Contenido de constituyentes químicos .....</b>	<b>32</b>
<b>Tabla 4. Límites permisibles de características bacteriológicas .....</b>	<b>33</b>
<b>Tabla 5. Principales diferencias entre revisiones narrativas y sistemática.....</b>	<b>35</b>
<b>Tabla 6. Valor de relevancia para selección de artículos .....</b>	<b>42</b>
<b>Tabla 7. Codificaciones de clasificación para el análisis multivariado .....</b>	<b>45</b>
<b>Tabla 8. Aplicación de los tratamientos fotoquímicos en diferentes tipos de agua residual .....</b>	<b>58</b>
<b>Tabla 9. Porcentajes calculados para la identificación de vacíos de identificación .....</b>	<b>61</b>
<b>Tabla 10. Categorías asignadas y denominación en el Análisis de Correspondencias Múltiples .....</b>	<b>63</b>
<b>Tabla 11. Análisis de Burt .....</b>	<b>64</b>
<b>Tabla 12. Componentes principales.....</b>	<b>66</b>
<b>Tabla 13. Se presentan las opiniones emitidas por los expertos consultados.....</b>	<b>1</b>

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1: Proceso de Osmosis Inversa</b> .....	25
<b>Figura 2:</b> Mapa hidrológico de la ciudad de Puebla.....	27
<b>Figura 3: Sistema complejo en el tratamiento de aguas residuales</b> .....	30
<b>Figura 4: Diagrama de selección de documentos de interés</b> .....	48
<b>Figura 5:</b> Número de publicaciones en los últimos años.....	49
<b>Figura 6:</b> Artículos reportados por país.....	50
<b>Figura 7:</b> Tendencia del uso de tratamientos fotoquímicos.....	51
<b>Figura 8:</b> Tendencia del tipo de agua residual empleada.....	53
<b>Figura. 9 Análisis de los componentes</b> .....	65
<b>Figura 10 Gráfico de las dos primeras componentes</b> .....	67
<b>Figura 11 Puntos objeto por número de caso</b> .....	69
<b>Figura 12. Diagrama de dispersión del número de artículos en dos dimensiones</b>	70

## RESUMEN

Los efluentes en México se encuentran severamente contaminados por los vertidos de aguas residuales, los cuales no tienen tratamientos adecuados de descontaminación, generalmente estas aguas son ocupadas como fuente de riego de miles de hectáreas. Los procesos fotoquímicos, se consideran tecnologías eficientes en la oxidación de contaminantes por la acción de radicales hidroxilos, sin embargo, en nuestro país son pocos los usos de los mismos. El objetivo de este trabajo fue analizar e identificar los principales tratamientos fotoquímicos (UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, UV/O<sub>3</sub> y UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/O<sub>3</sub>) y de ósmosis inversa para la descontaminación de efluentes mediante una revisión sistemática de diversos artículos científicos. Se realizó una revisión de la literatura en bases de datos como Scielo, Redalyc, NCBI, Science Direct y Scopus, durante el periodo 2010-2020, además de un Análisis de Componentes Principales (ACP) para identificar y analizar las variables claves en las publicaciones científicas. Como resultado de la búsqueda, se logró la obtención de una base de datos conformada por cien artículos científicos, en donde el tratamiento de peróxido de hidrógeno con ozono se caracterizó por una eficiencia de descontaminación del 80-90% y en caso de la ósmosis inversa una eficiencia de 90%, sin embargo, el tratamiento con solamente peróxido (UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) es el más utilizado, en donde influyen los tipos de contaminantes y el tipo de agua a tratar. Las variables en los artículos científicos fueron, el tipo de agua residual a utilizar, tipo de contaminante, y la presencia de bacterias nocivas para la salud. Concluyendo que los tratamientos UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/O<sub>3</sub> y ósmosis inversa muestran resultados eficientes en la eliminación de contaminantes emergentes y la inactivación de bacterias dañinas para la salud del ser humano.

Palabras clave: procesos fotoquímicos, revisiones sistemáticas, aguas residuales.

## **ABSTRACT**

Effluents in Mexico are severely contaminated by wastewater discharged, which do not have adequate decontamination treatments, generally these waters are used as a source of irrigation for thousands of hectares. Photochemical processes are considered efficient technologies in the oxidation of pollutants by the action of hydroxyl radicals, however, in our country there are few uses of them. The objective of this work was to analyze and identify the main photochemical treatments (UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, UV/O<sub>3</sub> and UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/O<sub>3</sub>) and reverse osmosis for effluent decontamination through a systematic review of various scientific articles. A literature review was carried out in databases such as Scielo, Redalyc, NCBI, Science Direct and Scopus, during the period 2010-2020, and a Principal Component Analysis (PCA) to identify and analyze the key variables in the publications. scientific. As a result of the search, a database made up of one hundred scientific articles was obtained, where the treatment of hydrogen peroxide with ozone was characterized by a decontamination efficiency of 80-90% and in the case of reverse osmosis an efficiency of 90%, however, the treatment with only peroxide (UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) is the most used, where the types of pollutants and the type of water to be treated influence. The variables of importance in the scientific articles were the type of wastewater to be used, type of contaminant, and the presence of bacteria harmful to health. Concluding that UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/O<sub>3</sub> and reverse osmosis treatments show efficient results in the elimination of emerging pollutants and the inactivation of bacteria harmful to human health.

Keywords: photochemical processes, systematic reviews, wastewater.

## I. INTRODUCCIÓN

El planeta se encuentra cubierto por el 70% de agua, sin embargo, sólo el 2.5% es agua dulce accesible para el ser humano. Se encuentra en ríos, lagos, depósitos subterráneos y sólo una parte es utilizable para el consumo humano sin tratamientos especiales (UNESCO, 2018).

De acuerdo con la Naciones Unidas (2018), cerca de 2100 millones de personas, no tiene acceso a los servicios básicos de agua y saneamiento, afectando al 40% de la población en el mundo, y 6 de cada 10, o sea 4500 millones, carecen de un saneamiento seguro. En México, 24 millones carecen de alcantarillado y cerca de 12.5 y 15 millones no reciben un suministro de agua potable suficiente, aunado a la gran cantidad de cuerpos de agua, superficiales y subterráneos, contaminados y sobreexplotados (OMS, 2017), lo que podría aumentar debido a que el 80% de las aguas residuales sin tratamiento se vierten en los ríos y mares. Para el año 2050, se estima una afectación del 25% de la población mundial por la escasez del agua destinada para consumo humano (AGENDA 2030).

Los cuerpos de agua cada año reciben millones de metros cúbicos de aguas residuales ya sea de descargas municipales, industriales, agrícolas o ganaderas, tratadas de forma inadecuada o sin tratamiento. Los tratamientos que son aplicados, constan de un conjunto de operaciones físicas, biológicas y químicas, con el propósito de eliminar la mayor cantidad de contaminantes antes de su vertido, de forma que los niveles de contaminación que queden en los efluentes tratados cumplan los límites legales existentes y puedan ser asimilados de forma natural por los cauces receptores (Crites *et al.*, 2006).

En el estado de Puebla se han realizado estudios sobre el río Atoyac en los cuales se indica que su contaminación ha incrementado con el tiempo y cuya agua que es utilizada para el riego de cultivos no es apta de acuerdo a la NOM CE-CCA-001-1989, además de que podría estar contaminando el agua pozos y manantiales cercanos al río, generando problemas de salud graves (Pérez *et al.*, 2018).

A lo largo del tiempo, se han realizado diferentes estudios sobre la dificultad de los tratamientos convencionales para remover o transformar químicamente muchos de los contaminantes, dado que en la depuración de las aguas residuales no se implementan tratamientos terciarios. Con el objetivo de poder reutilizar las aguas tratadas, se está recurriendo a la búsqueda de nuevas alternativas eficientes para el tratamiento de las aguas residuales. En las últimas décadas, se han propuesto a los procesos de oxidación avanzada (POA) como una opción para el tratamiento de aguas que presentan contaminantes difícilmente biodegradables, donde el radical hidroxilo ( $\bullet\text{OH}$ ) funge como principal agente oxidativo y demostrando una eficacia en la eliminación de bacterias nocivas al ser humano (Torres *et al.*, 2003).

Algunos de los tratamientos que se reportan con mayor frecuencia en la literatura son los implementados con luz ultravioleta en combinación con peróxido de hidrógeno (UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>), Ozono (UV/O<sub>3</sub>) y peróxido de hidrógeno/ozono (UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/O<sub>3</sub>), los cuales son tecnologías eficientes en la oxidación de materia orgánica y hasta la mineralización completa de algunos contaminantes, lo que reduce la demanda química de oxígeno (DQO), toxicidad y el carbono orgánico total (COT) en el agua (Chiva *et al.*, 2017).

Una de las principales evidencias dentro de las investigaciones científicas son las revisiones sistemáticas, las cuales constituyen una herramienta esencial para sintetizar la información científica disponible, incrementar validez de los estudios individuales e identificar áreas de incertidumbre en donde se requiera realizar investigaciones más profundas (González *et al.*, 2011).

Dada esta información, el objetivo de este estudio fue una revisión sistemática de la frecuencia del uso y efectividad de los principales procesos fotoquímicos (UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, UV/O<sub>3</sub>, UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/O<sub>3</sub>) y la complementación con otros tratamientos como es la ósmosis inversa, utilizados en diferentes tipos de efluentes de aguas residuales en los que se destacan ríos y aguas simuladas en laboratorio, en países de América Latina y el mundo.

## II. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En la actualidad la generación y el vertido de aguas residuales a los efluentes es uno de los principales problemas, dado que la mayoría de estas aguas no reciben algún tipo de tratamiento previo a su vertido.

El agua residual vertida es comúnmente usada por los agricultores para el riego de sus cultivos, lo que puede ocasionar graves enfermedades como cáncer y resistencia microbiana a antibióticos, entre otras; se cuentan alrededor de 20 tipos diferentes de enfermedades transmitidas por agua contaminada (WWDR, 2017). Además, no sólo se tiene afectaciones a la salud humana sino también a los ecosistemas y los organismos con los que interacciona.

El estado de Puebla enfrenta graves problemas de contaminación de sus efluentes, destacándose el río Atoyac como uno de los más afectados por las descargas de aguas residuales de las industrias y de los desechos de la población; el río Atoyac desemboca en la presa Manuel Ávila Camacho, "Valsequillo", que, también recibe las descargas de los ríos Zahuapan y Alseseca. El agua almacenada es utilizada para el riego de cultivos de aproximadamente 20 mil hectáreas, afectando tanto a las hortalizas como a la salud de las personas que entran en contacto con el agua residual.

Además, se debe tener en cuenta el problema de sobreexplotación y abastecimiento de agua potable, en donde sólo se proponen soluciones temporales y sobre criterios costo-beneficio, sin tomar en cuenta los costos ecológicos y sociales que acarrearán.

En varios países se han reportado diferentes estudios sobre la calidad del agua y los tratamientos que se podrían aplicar para el mejoramiento de las aguas residuales, siendo así un tema de importancia para la sociedad, tanto económica y de salud como para la conservación de sus ecosistemas.

Actualmente las aguas residuales pueden pasar por una serie de tratamientos (primarios y en algunos casos secundarios) para lograr la eliminación de sus agentes contaminantes, sin embargo, no todos los procesos son eficientes para la

degradación de contaminantes emergentes como las sustancias farmacéuticas y otros compuestos químicos.

### **III. JUSTIFICACIÓN**

La mayoría de los efluentes de México presentan un grado de contaminación; esto se debe a que la mayoría de las descargas industriales, municipales y no municipales son vertidos sin algún tratamiento eficiente o con bajo grado de eliminación de los contaminantes, dañando la salud de las personas que entran en contacto con ella.

El tratamiento de aguas mediante procesos fotoquímicos asociado a otros procesos como la ósmosis inversa permite una mayor reducción de contaminantes presentes en estas aguas, obteniendo una óptima mineralización de los contaminantes no biodegradables y la producción de agua útil sin causar daño al consumidor.

En años recientes el uso de las revisiones sistemáticas ha sido utilizado como un método de investigación, dado que puede abordar hallazgos y perspectivas de una manera general en investigación interdisciplinaria. Así mismo, se demuestra evidencia a un meta-nivel lo que permite el descubrimiento de nuevas áreas de investigación, así las revisiones sistemáticas son un instrumento que ayuda en la toma de decisiones tanto en el ámbito de las ciencias sociales, así como en el de la salud y por lo tanto en las ciencias ambientales en donde se utilizan continuamente y pueden contribuir positivamente a la solución de los problemas de la contaminación. Dado esta información, las revisiones son de utilidad cuando se quiere evaluar la teoría o la evidencia en un área determinada, para examinar la validez de una teoría o teorías y para exponer cuales son las mejores evidencias o pruebas científicas de cualquier problema o pregunta social, educativa, clínica entre otros.

Tomando esto en cuenta, una revisión de la literatura sobre la implementación de tecnologías como procesos fotoquímicos y de ósmosis inversa para el correcto tratamiento de las aguas residuales abrirá un panorama actual sobre los mejores

tratamientos, así como la frecuencia de su uso en diferentes tipos de aguas residuales y que podrían ser manejados en nuestro país como una alternativa de tratamiento, mejorando así la calidad del agua para su posterior uso en servicios de la industria o en el riego de cultivos.

#### **IV. PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN**

¿Cuál de los tratamientos fotoquímicos (UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, UV/O<sub>3</sub> y UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/O<sub>3</sub>) y de ósmosis inversa es la mejor opción para la remoción de contaminantes orgánicos, así como aquellos persistentes y carga bacteriana en diferentes tipos de aguas residuales?

#### **V. HIPÓTESIS**

Una revisión sistemática de los diferentes estudios de investigación sobre los procesos fotoquímicos (UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, UV/O<sub>3</sub> y UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/O<sub>3</sub>) y de ósmosis inversa, permitirá conocer el/los tratamientos(s) con mayor eficiencia para la remoción de contaminación y la carga bacteriana en distintos tipos de agua residual.

## **VI. OBJETIVOS**

### **6.1. Objetivo General**

Analizar los principales tratamientos fotoquímicos (UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, UV/O<sub>3</sub> y UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/O<sub>3</sub>) y de ósmosis inversa para la descontaminación de efluentes mediante una revisión sistemática del tipo de tratamiento, de agua residual, de contaminante y carga bacteriana, integrado con la opinión de expertos.

### **6.2. Objetivos específicos**

1. Identificar los sistemas fotoquímicos (UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, UV/O<sub>3</sub> y UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/O<sub>3</sub>) y de ósmosis inversa más eficientes para la remoción de contaminantes de diferentes tipos de agua residual, mediante una revisión sistemática.
2. Comparar y analizar la opinión de expertos en temas de descontaminación y evaluación de las aguas residuales, así como la eficiencia de los procesos fotoquímicos en el caso del estado de Puebla y la revisión sistemática.

## VII. MARCO TEORICO

### 7.1. Contaminación del agua

Como recurso indispensable, el agua, se ha convertido en uno de los principales problemas de las últimas décadas, el crecimiento poblacional, de la industria y de la creación de nuevas sustancias, han ocasionado el vertido de aguas altamente contaminadas a ríos y océanos. Además de la contaminación a los efluentes, uno de los problemas a los que se enfrenta la humanidad, es la escases del recurso causando la desertización de varios acuíferos, afectando ecosistemas y a las poblaciones.

La contaminación del agua, de acuerdo con la Organización Mundial de la Salud, se puede explicar como la introducción de manera directa o indirecta de sustancias y materiales externos al medio, implicando una degradación de la calidad hídrica. Dentro de los principales contaminantes del agua, se contemplan a los residuos vertidos como fertilizantes, pesticidas o diversos químicos que desembocan en los efluentes de agua dulce y que terminan contaminando los mares y océanos en donde uno de los principales contaminantes son los residuos plásticos o microplásticos (Mendoza y Balcer, 2019). Los contaminantes más comunes que se encuentran en el agua son los productos químico-orgánicos, metales pesados, microbios patógenos, materia orgánica persistente y residuos resultantes de la agricultura y ganadería como son el fósforo y el nitrógeno, entre otros (ONU y WWAP, 2009).

Los vertidos que contaminan el agua se pueden clasificar en diferentes tipos: aguas de procesos, aguas fecales y aguas blancas. El primero, es un vertido de los procesos productivos y dependerá de la actividad industrial; el vertido por aguas fecales, es generado por los aseos y las aguas residuales domésticas. Por último, el vertido de aguas blancas o “aguas crudas” por su carácter previo a la potabilización (Schwarzenbach *et al.*, 2010).

Los contaminantes se pueden clasificar de acuerdo con sus características específicas, pueden ser físicos, químicos o biológicos:

**Contaminantes físicos:** son el resultado de componentes sólidos o materiales en suspensión, que afectan a los ecosistemas dulceacuícolas y como consecuencia obstruyen el paso de la luz. Algunas de las características físico-químicas del agua que se pueden medir para estos tipos de contaminantes son:

- i) **Temperatura:** los cambios en la temperatura son un indicador de la presencia de contaminación térmica debido a la actividad del hombre. Parte de las consecuencias son la modificación de los equilibrios ecológicos, de las reacciones bioquímicas y de las características fisicoquímicas del agua.
- ii) **Potencial de Hidrógeno (pH):** su variación puede deberse a medios naturales o artificiales. En las aguas naturales la variación del pH ejerce una influencia sobre las distintas reacciones que se llevan a cabo en el agua.
- iii) **Conductividad:** El agua pura tiene muy poca conductividad, por lo que la medida de la conductividad, nos da una idea de los sólidos disueltos en la misma.

**Contaminantes químicos:** son aquellos que incluyen compuestos orgánicos e inorgánicos disueltos o dispersos en el agua. Los más comunes son:

- i) **Contaminantes inorgánicos:** aquellos productos disueltos o dispersos en el agua que provienen de descargas domésticas, agrícolas e industriales. Los más comunes son: cloruros, sulfatos, nitratos y carbonatos. También se consideran a los desechos ácidos, alcalinos y gases tóxicos disueltos en el agua como los óxidos de azufre, de nitrógeno, amoníaco, cloro y sulfuro de hidrógeno (ácido sulfhídrico).
- ii) **Metales pesados:** la contaminación por metales en el agua tiene efectos tóxicos y bioacumulación en la cadena trófica, se debe principalmente a actividades antrópicas, las principales fuentes son la minería,

metalúrgica, vehículos automotores y el aporte natural en ciertos acuíferos (Singh *et al*; 2010, Chen *et al.*, 2013).

**Contaminantes orgánicos:** dentro de estos contaminantes se consideran los desechos humanos y animales, productos químicos industriales de origen natural como aceites, grasas, breas; y diversos productos químicos sintéticos como pinturas, herbicidas, insecticidas, etc. Que consumen el oxígeno disuelto en el agua y afectan a la vida acuática. Algunos parámetros indicadores de contaminantes orgánicos son:

- i) Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO): Es el parámetro más utilizado y suele determinarse a los 5 días (DBO<sub>5</sub>). Es la cantidad de oxígeno disuelto en el agua (mg/L) que los microorganismos asimilan para oxidar enzimáticamente las sustancias biodegradables en cinco días. Donde se degradan tres tipos de materiales: Materiales orgánicos carbónicos (microorganismos aerobios heterótrofos), nitrógeno oxidable y compuestos químicos reductores.
- ii) Demanda Química de Oxígeno (DQO): Es la cantidad de oxígeno necesario en mg/L disuelto en el agua para oxidar totalmente los contaminantes.
- iii) Carbono orgánico total: Es la cantidad de todo el carbono de compuestos orgánicos (incluyendo la materia viva) independientemente del estado de oxidación. Y engloba la suma de todos los compuestos orgánicos presentes en la muestra.
- iv) Nitrógeno total y amoniacal: son compuestos encontrados en grandes cantidades que contribuyen en el agotamiento del oxígeno y la eutrofización de las aguas.
- v) Fósforo: este compuesto no está presente de forma natural en las aguas, procede comúnmente de los excrementos y de los detergentes. Se encuentra en tres formas: ortofosfatos solubles, polifosfatos inorgánicas y fosfatos orgánicos.

**Contaminantes biológicos:** son aquellos que provienen del interior de un ser vivo, o alguna parte de ellos. Entre los contaminantes más comunes encontramos: hongos, bacterias, excremento, esporas, virus, residuos en descomposición, amebas, huevos de helmintos, entre otros. Parte de estas bacterias son las encargadas de la degradación de la materia orgánica presente y otras son inofensivas. Su acumulación se debe principalmente a la rápida urbanización y la falta de tratamiento de las aguas residuales. Entre los principales parámetros de este grupo se encuentran:

- i) Coliformes totales y fecales: el análisis bacteriológico es vital en la prevención de epidemias como resultado de la contaminación de agua, el ensayo se basa en que todas las aguas contaminadas por aguas residuales son potencialmente peligrosas (Roldán, 2003).

**Contaminantes emergentes (CE):** son un conjunto de compuestos químicos, en la mayoría de los casos corresponden a contaminantes no regulados, de distinto origen y naturaleza química. Estos pueden causar efectos negativos por sus altas tasas de transformación/remoción. Se pueden sub clasificar de acuerdo a su grado de degradación como, contaminantes orgánicos degradables que sufren degradaciones bajo condiciones naturales, por ejemplo, hormonas esteroideas, farmacéuticos y productos de higiene o belleza personal (Sauvè y Desrosiers, 2014); y los contaminantes orgánicos persistentes (COP's), que no se degradan fácilmente y pueden subsistir intactos durante cientos de años (El-Shahawi *et al.*, 2010).

Una gestión inadecuada del agua residual, conlleva al riesgo de salud de millones de personas que ingieren o entran en contacto con agua contaminada o polucionada químicamente. Esta contaminación también pone en riesgo a los ecosistemas acuáticos y los organismos que se encuentran en ellos, algunos terminan desapareciendo por la rápida proliferación de algas que se nutren de los nutrientes que proporcionan los residuos de las aguas contaminadas (Gil *et al.*, 2012).

La falta de saneamiento, causan en el mundo enfermedades como colera, diarreas, disentería, hepatitis A, fiebre tifoidea y poliomielitis. Se calcula que unas 842 000 personas mueren cada año de diarrea, de entre las cuales 800 y 1000 son niños. La mayor parte de las enfermedades infecciosas son transmitidas por el agua, en donde anualmente se registran más de 3.2 millones de vidas en el mundo (OMS, 2019).

De la misma manera, el agua puede contener contaminantes que generan enfermedades de la piel, cáncer o problemas congénitos. Cuando la concentración de metales pesados como Mercurio, Níquel, Cobre, Plomo o Cromo sobrepasa los límites permitidos pueden generar enfermedades crónicas graves (OMS, 2017).

#### **7.1.1. Tratamiento de agua residual**

El tratamiento de las aguas residuales persigue remover la mayor cantidad posible de contaminantes antes de su vertido y consta de un conjunto de operaciones físicas, biológicas y químicas, con la finalidad de obtener resultados bajos de contaminación y que cumplan con los marcos legales existentes sin daño para los cauces y ecosistemas receptores.

De primera instancia, se realiza un pretratamiento a las aguas residuales, con el objetivo de separar la mayor cantidad de materia orgánica o inorgánica que pueda ser problema en los tratamientos posteriores; estos pretratamientos incluyen operaciones físicas y mecánicas como la separación de sólidos, tamizado, desbaste y desengrasado (Wei Kwang, 2016).

Según Spellman (2014), los tratamientos se dividen en tres:

- 1) Tratamientos primarios:** su principal objetivo es la eliminación de los sólidos en suspensión, reducción de la contaminación biodegradable; pasando por un proceso físico o fisicoquímico, en donde se incluye la sedimentación de sólidos y otros procesos en los que la DBO<sub>5</sub> de las aguas residuales se

reduzca en un 20% antes del vertido, así como una disminución del 50% de los sólidos en suspensión. Los tratamientos más comunes son los fisicoquímicos y la decantación primaria.

- 2) Tratamientos secundarios:** son procesos que incluyen un tratamiento biológico con sedimentación secundaria u otro procedimiento en el que se consiga la eliminación de materia orgánica. El tratamiento se realiza con la ayuda de microorganismos (fundamentalmente bacterias) que en condiciones aerobias actúan oxidando la materia orgánica presente en las aguas residuales.
- 3) Tratamientos terciarios:** Estos procesos permiten obtener efluentes finales de mejor calidad para que puedan ser vertidos en zonas donde los requisitos son más exigentes o puedan ser reutilizados. Actualmente los más utilizados en estas etapas con los procesos avanzados de oxidación.

### **7.1.2. Procesos de oxidación avanzada**

Los Procesos Avanzados de Oxidación (POA) o las Tecnologías Avanzadas de oxidación (TAOs), forman parte de los tratamientos terciarios y han sido ampliamente utilizadas para la degradación de contaminantes y detoxificación de aguas residuales; pueden definirse como procesos que implican la formación de radicales hidroxilos ( $\bullet\text{OH}$ ) de potencial de oxidación mucho mayor que el de otros oxidantes tradicionales; y son capaces de mineralizar y oxidar casi cualquier molécula orgánica produciendo algunos aniones inorgánicos y  $\text{CO}_2$ . En el caso de microorganismos, estos radicales atacan la doble capa bilipídica de la pared externa de la célula, generando reacciones de peroxidación lipídica mortales para el microorganismo (Ollis y Ekabi, 2000).

Los procesos se clasifican en dos grandes bloques: los procesos fotoquímicos, que emplean la radiación en la región del ultravioleta para generar los radicales  $\bullet\text{OH}$ , y

los POAs no fotoquímicos, en el que los radicales hidroxilos se forman a través de la transformación de especies químicas o mediante el uso de otras fuentes de energía distintas de la luz (Tabla 1).

Tabla 1. Clasificación de los Procesos de Oxidación Avanzada (Terán, 2016)

No fotoquímicos	Fotoquímicos
Ozonización en medio alcalino ( $O_3/ OH$ )	Fotólisis con radiación ultravioleta (UV)
Ozonización con peróxido de hidrogeno ( $O_3/H_2O_2$ )	Peróxido de hidrógeno con radiación ultravioleta ( $H_2O_2/UV$ )
Ozonización catalítica ( $O_3/catalizador$ )	Ozono y radiación ultravioleta ( $O_3/UV$ )
Procesos Fenton y relacionados ( $Fe^{2+}/H_2O_2$ ) ó ( $H_2O_2/ Catalizador sólido$ )	Peróxido de hidrogeno, ozono y radiación ultravioleta ( $H_2O_2/ O_3/UV$ )
Oxidación electroquímica/ electrocatalítica	Foto-Fenton ( $Fe^{2+}/H_2O_2/ UV$ ) ó ( $Catalizador/H_2O_2/ UV$ )
Radiólisis y tratamiento con haces de electrones	Fotocatálisis heterogénea ( $Catalizador/O_2/UV$ )
Ultrasonidos	

Los POA más utilizados abarcan procesos como ozono/luz UV, Peróxido de hidrógeno con radiación ultravioleta ( $H_2O_2/UV$ ), ultrasonido, fotocatalisis heterogénea y homogénea, y los tratamientos electroquímicos. Son de creciente interés debido a que estudios recientes sugieren la posibilidad de la utilización de energía solar como fuente de fotones, lo que sería una ventaja medioambiental y de ahorro energético. Un amplio rango de aplicaciones ha sido reportado para diferentes compuestos usando estos sistemas (Rodríguez, *et al.*, 2002).

### 7.1.3. Procesos Fotoquímicos

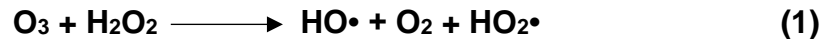
Los procesos fotoquímicos han sido propuestos como una alternativa simple, económica y sostenible para el tratamiento de aguas contaminadas con sustancias antropogénicas difícilmente biodegradables (Ollis y Ekabi, 2000). Así como para purificar y desinfectar aguas destinadas al consumo humano (Blesa, 2001). Los cuales tienen como principio la acción de la radiación solar, es decir, la utilización de un sistema sensible a los fotones.

La oxidación fotocatalítica consiste en la formación de radicales hidroxilos y la utilización de catalizadores y radiación solar ultravioleta, los cuales tendrán un efecto oxidante que promoverá la eliminación de los contaminantes químicos y orgánicos, el cual sucede en la superficie de la partícula utilizada como catalizador o semiconductor por lo general se utiliza dióxido de titanio ( $\text{TiO}_2$ ), siendo la radiación solar la única fuente de energía. Otra alternativa para el tratamiento de las aguas residuales son la utilización de fotocatálisis heterogénea con  $\text{TiO}_2$  y la fotooxidación con compuestos férricos (Coz y Villaseñor, 2003).

A pesar de que varios semiconductores (óxido de zinc ( $\text{ZnO}$ ), dióxido de zirconio ( $\text{ZrO}_2$ ), dióxido de estaño ( $\text{SnO}_2$ ), sulfuro de cadmio ( $\text{CdS}$ ), entre otros) han sido empleados en la degradación fotocatalítica de compuestos orgánicos (Fernández *et al.*, 2004), el  $\text{TiO}_2$  es el semiconductor que ha recibido mayor interés en la investigación y desarrollo para su aplicación en fotocatálisis heterogénea. Otra de sus ventajas es el presentar un costo bajo o moderado, esto debido a que es un elemento abundante en la corteza terrestre y es utilizado en gran parte de productos como protecciones solares, pigmentos etc. Además, presenta una actividad fotocatalítica relativamente alta, estabilidad frente a la foto-corrosión (estabilidad fotoquímica), es inerte químicamente y su toxicidad es baja.

Las aplicaciones relativas al tratamiento de contaminantes en fase acuosa con este catalizador son, sin duda, las más numerosas en la bibliografía científica.

El mecanismo de reacción para la fotólisis del peróxido de hidrógeno con ozono (**UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/O<sub>3</sub>**), se basa en la ruptura del enlace entre oxígenos por la acción de la radiación ultravioleta para formar dos radicales hidroxilos.

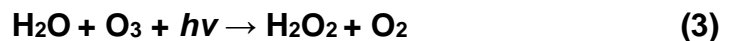


La adición de la luz al proceso incrementará la eficiencia. Este proceso se emplea para la potabilización de aguas con alta contaminación, en desinfección y decoloración de aguas de la industria del papel o incluso en la degradación de hidrocarburos alifáticos clorados (Litter, 2005).

Otro tipo de proceso fotoquímico es por peróxido de hidrógeno (**UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>**), en el cual se forman radicales hidroxilos por fotólisis del peróxido de hidrógeno y sus reacciones de propagación. Consiste en la ruptura homolítica de enlace O-O debido a la acción ultravioleta (Litter, 2005)



El proceso con ozono (**UV/O<sub>3</sub>**), potencia su actividad cuando se le aplica una radiación UV, normalmente de 200 – 460 nm. Con esto, el ozono se descompone a través de una secuencia de reacciones que producen finalmente radicales hidroxilos.



Este tratamiento se emplea en la potabilización de aguas y en aguas de las industrias, aceituneras, textil, papelera entre otras (Litter, 2005).

#### 7.1.4. Ósmosis inversa

La tecnología de la ósmosis inversa se basa en el proceso de ósmosis, un fenómeno natural que consiste en el paso recíproco de líquidos de distinta densidad, a través de una membrana semipermeable que los separa, el agua fluye desde la solución de menor salinidad hasta otra de mayor concentración salina (Binnie *et al*; 2009). Este flujo se detendrá cuando se logre un equilibrio entre ambas concentraciones.

Si se utiliza una presión superior a la presión osmótica, se produce el efecto contrario, la osmosis inversa. Los fluidos se presionan a través de la membrana y se forma el permeado, mientras que los sólidos disueltos quedan en otra corriente que se llama rechazo (Fig. 1).

En el sistema de ósmosis inversa, la energía que mayormente se utiliza, es para la bomba de agua que hace fluir el agua por las membranas.

Este proceso remueve la mayoría de los compuestos orgánicos y hasta el 99% de todos los iones, también elimina el 99.99% de virus y bacterias (Escobedo *et al.*, 2006).

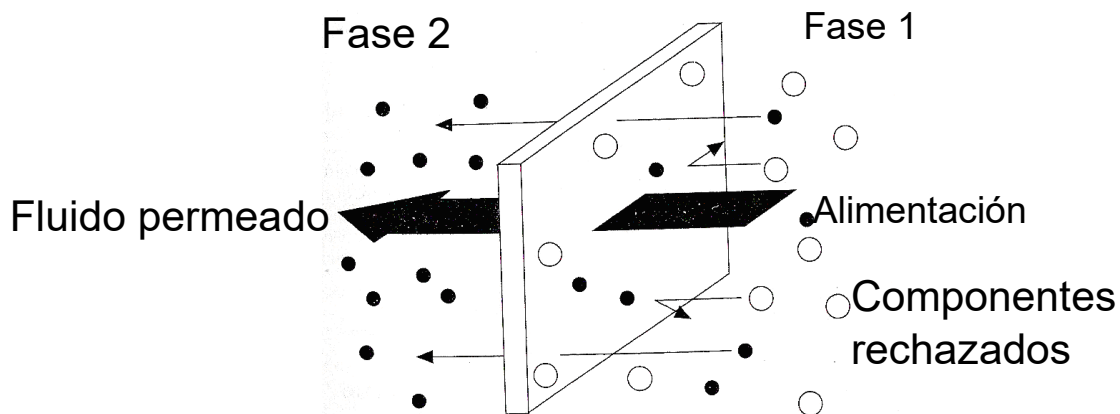


Figura 1. Proceso de Ósmosis Inversa

Se generan dos corrientes, una que es la que atraviesa la membrana y queda libre de sólidos disueltos (minerales, materia orgánica, etc.) y de microorganismo (virus, bacterias, etc.) llamada producto o permeado. La otra corriente se concentra de sólidos disueltos y microorganismos, constituyendo lo que se denomina como

concentrado. La membrana rechaza las bacterias y el 85%-95% de sólidos inorgánicos, la osmosis inversa es una tecnología de rechazo en porcentaje, la pureza del agua producida depende de la pureza del agua de donde se obtiene (Escobedo *et al.*, 2006).

El proceso consta de tres soluciones principales:

- Alimentación (a), es la solución de agua que llega a las membranas de ósmosis inversa previamente presurizada por la bomba de alta presión. Al cual se le denomina "lado de alta".
- Permeado (p), o denominado de "baja presión" es el resultante del otro lado de la membrana después de atravesarla.
- Rechazo (r), es la solución más concentrada y que no puede atravesar la membrana.

## **VII. MARCO CONTEXTUAL**

### **7.2. El agua en México y Puebla**

El agua en nuestro país se utiliza principalmente en la agricultura aproximadamente un 68.23% de volumen de agua, un 14.52% y 7.41% se ocupa para uso público e industrial respectivamente (CONAGUA, 2018).

Las cuencas como Lerma-Santiago-Pacífico, la del Balsas y, sobre todas, la del Valle de México, son conocidas por su mala calidad del agua y sus grandes cantidades de contaminantes presentes (Boehm, 2005).

El país cuenta con 731 cuencas hidrológicas, 105 están en condiciones de sobreexplotación y 104 muestran problemas de disponibilidad. A finales del año 2019 se registró un total de 979 de plantas potabilizadoras en operación con un caudal potabilizado de 115,636.5 l/s (CONAGUA, 2019).

Cifras del INEGI (2015) indican que, de los 2 mil 457 municipios y delegaciones de nuestro país, solo el 34% cuentan con plantas de tratamiento de aguas residuales municipales. Casi el 90% de las empresas no aplica tratamiento a las aguas que generan sus actividades.

Puebla cuenta con recursos hídricos importantes fuentes de agua superficial y subterránea. Las cuales se distribuyen en cuatro regiones hidrológicas importantes: Balsas al centro, Pánuco al noroeste, Papaloapan al este y sureste y Tuxpan-Nautla al norte (Fig. 2). El aprovechamiento del recurso es de la siguiente manera: agricultura (1,962 hm<sup>3</sup>), abastecimiento público (385 hm<sup>3</sup>), industria autoabastecida (35.2 hm<sup>3</sup>) y energía eléctrica excluyendo hidroelectricidad (6.5 hm<sup>3</sup>) (PADHPOT, 2012).

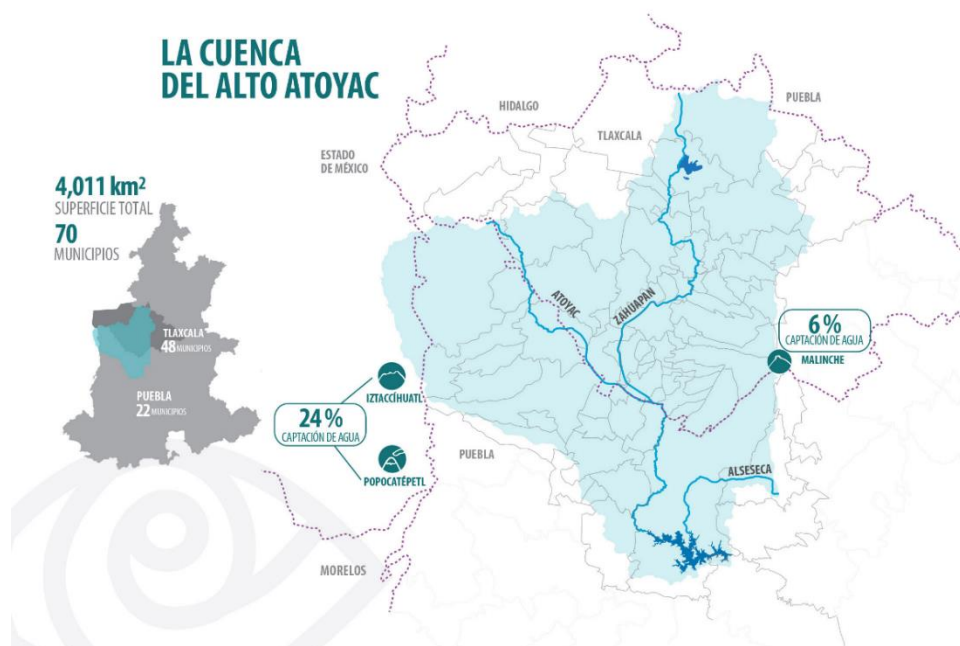


Figura 2. Mapa hidrológico de la ciudad de Puebla, Fuente: dalelacara.org, 2018

El acuífero del Alto Atoyac es la principal fuente de agua potable, abastece a los estados de Tlaxcala y Puebla, suministrando el área metropolitana y a las ciudades de Apizaco, San Martín Texmelucan, Huejotzingo, San Miguel Xoxtla, San Salvador el Verde, Amozoc, San Andrés y San Pedro Cholula. Cubre una extensión de 1,470 km<sup>2</sup> y cuenta con tres zonas de recarga, una en las colinas de los volcanes Iztaccíhuatl y Popocatepetl, en las inmediaciones de La Malintzi y una última en la parte norte del acuífero llamado Sierra de Tlaxco (CONAGUA, 2018).

En el Estado de Puebla y los parques industriales de diferentes giros como lo son el químico, textil, materiales de construcción, automotriz entre otros, distribuidos en 12 parques industriales, que realizan descargas no controladas a los ríos Atoyac, Alseseca y Zahuapan los cuales realizan un recorrido atravesando la ciudad hasta llegar a la presa Manuel Ávila Camacho, “Valsequillo”, la cual es almacenada para su uso posterior de riego agrícola (CONAGUA, 2015), su almacenaje es de aproximadamente 300 millones de metros cúbicos de agua.

En la presa Manuel Ávila Camacho (Valsequillo) se acumulan sedimentos, aguas de desecho de la población y de las más de diez mil industrias, esta contaminación causa un impacto ecológico, más la deforestación dan lugar a una situación ambiental grave para la cuenca y el espacio socio-natural. Aproximadamente 33 mil 820 hectáreas de cultivos son regadas con el agua de la presa, pertenecientes a los valles del Distrito de Riego 030 “Valsequillo” y la Zona de Riego de Atlixco-Izúcar de Matamoros. La cual abarca los Valles de Tecamachalco, Tlacotepec y Tehuacán (Zamora, 2014), las cuales tiene riego restringido por la contaminación del agua (IV Foro Mundial del Agua, 2006).

En el año 2011 se realizó una declaratoria llamada “Declaratoria de clasificación del Atoyac y Xochiac o Hueyepan y sus afluentes” con la finalidad de determinar los parámetros que se deben cumplir en las descargas contaminantes, así como las metas de la calidad del agua del río. Sin embargo, con estudios a lo largo de los años, se ha demostrado la presencia de contaminantes de alta toxicidad (Martínez *et al.*, 2017).

De acuerdo con un estudio de la Comisión Nacional de Derechos Humanos (CNDH) de 2017, el río Atoyac tiene al menos 25 sustancias nocivas, causantes de enfermedades como la hepatitis, cólera, cáncer y en mujeres embarazadas puede generar afectaciones a la genética de sus hijos.

Las comunidades que carecen de agua para el riego de sus cultivos o de pozos, comúnmente utilizan el agua residual aun estando conscientes o no del daño que se ocasiona al ocuparla. En los lugares donde se ha utilizado el agua residual para el riego agrícola, se reportan cantidades mayores en las concentraciones de metales pesados (García *et al.*, 2000).

Un informe sobre decesos y enfermedades gastrointestinales por la contaminación en el agua de los ríos asegura que 11,143 personas en seis municipios presentan riesgo de morir por enfermedades gastrointestinales. Datos de CONAGUA (2021) reportados durante el año 2019 informan que el 72% de las aguas superficiales presentaban valores superiores a 100 MPN/100ml de coliformes fecales (FC) y estudios realizados en los últimos años del río Atoyac, reportan una contaminación microbiológica que excede 350 veces el nivel máximo permisible (1000 MPN/100ml) de la norma mexicana (NOM-001-SEMARNAT,1996).

### 7.2.1. Relación sociedad – Medio ambiente

En esta investigación se encuentran interrelacionados varios aspectos a considerar como lo son económicos, políticos, sociales, tecnológicos, salud y bienestar humano y ecológico, formando un sistema complejo como se muestra en la figura 3.

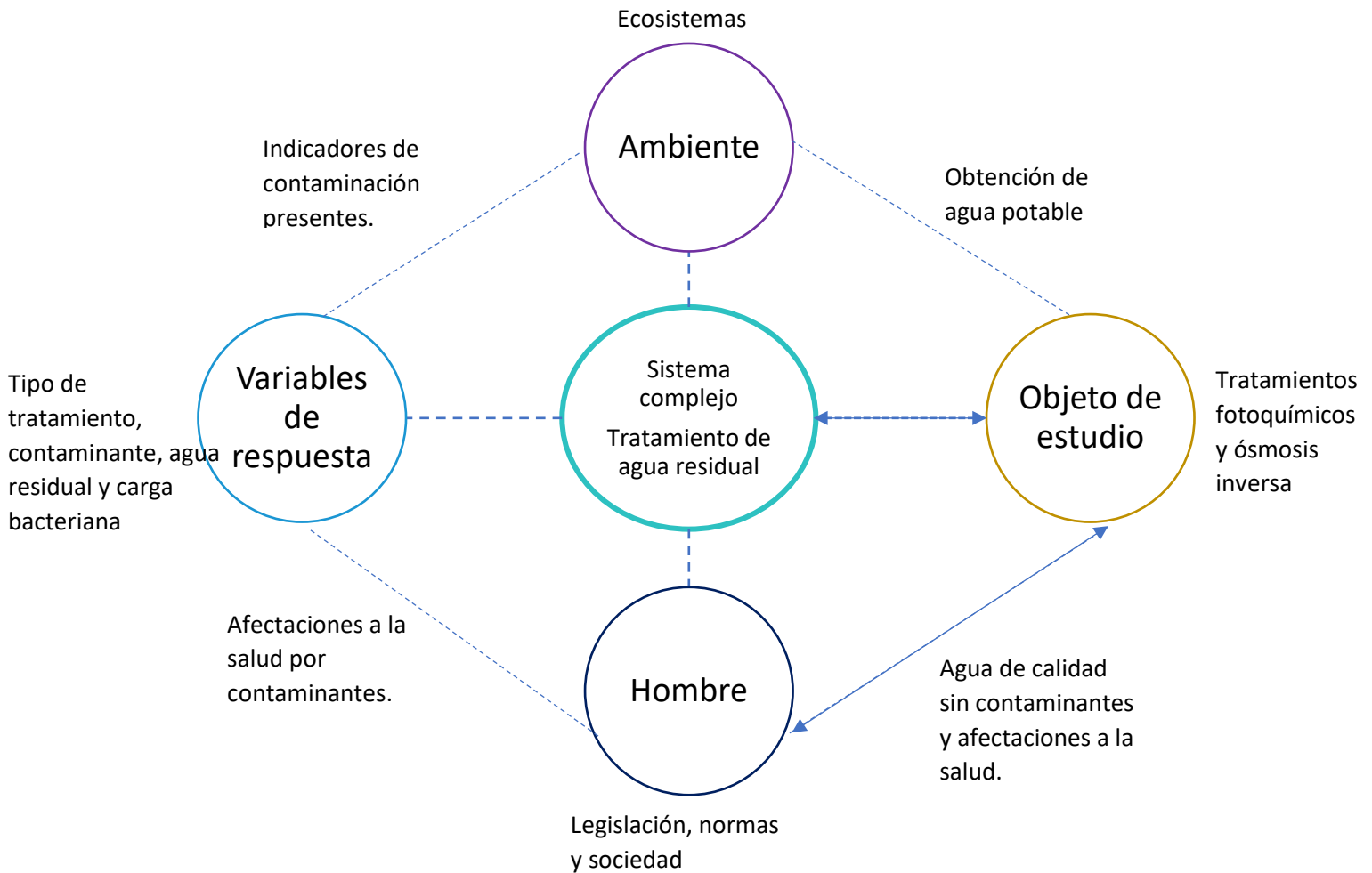


Fig. 3. Sistema complejo en el tratamiento de aguas residuales, Fuente: Amaro, 2021.

### 7.2.2. Marco legal

Algunas de las leyes y normas que se relacionan con el manejo y uso del agua en México y que serán de referencia para esta investigación son las siguientes:

- Ley de aguas nacionales.
- Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente.
- Ley del Agua para el Estado de Puebla.
- NOM-001-SEMARNAT-1996.
- NOM-002-SEMARNAT-1996.
- NOM-003-SEMARNAT-1997.
- NMX-AA-003-1980. Muestreo de aguas residuales.
- NMX-AA-089/1-SCFI-2010. Protección al ambiente - calidad del agua.
- NMX-AA-089/2-SCFI-2010. Protección al ambiente - calidad del agua.
- NMX-AA-030-SCFI-2001. Análisis de agua.
- Norma Oficial Mexicana NOM CCA/032-ECOL/1993. Límites permisibles de contaminantes del agua.
- AGENDA 20-30 para el desarrollo sostenible. Objetivo No. 6. Garantizar la disponibilidad y la gestión sostenible del agua y el saneamiento para todos.

Las siguientes tablas contienen los límites permisibles de calidad del agua y los tratamientos de potabilización del agua y consumo humano, que deben cumplir los sistemas de abastecimiento públicos y privados o cualquier otra persona física o moral que la distribuya, de acuerdo con la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994.

Tabla 2. Límites permisibles de calidad del agua, Fuente: Diario Oficial de la Federación., 2000

CARACTERÍSTICA	LÍMITE PERMISIBLE
Organismos coliformes totales	2 NMP/100 ml
Organismos coliformes fecales	2 UFC/100 ml No detectable NMP/100 ml Cero UFC/100 ml
Color	20 unidades de color verdadero en la escala de platino-cobalto.
Olor y sabor	Agradable (se aceptarán aquellos que sean tolerables para la mayoría de los consumidores, siempre que no sean resultados de condiciones objetables desde el punto de vista biológico o químico).
Turbiedad	5 unidades de turbiedad nefelométricas (UTN) o su equivalente en otro método.

Tabla 3. Contenido de constituyentes químicos. Los límites se expresan en mg/l, excepto cuando se indique otra unidad. Fuente: Diario Oficial de la Federación., 2000

CARACTERÍSTICA	LÍMITE PERMISIBLE
Aluminio	0.20
Arsénico	0.05
Bario	0.70
Cadmio	0.005
Cianuros (como CN-)	0.07
Cloro residual libre	0.2-1.50
Cloruros (como Cl-)	250.00
Cobre	2.00
Cromo total	0.05
Dureza total (como CaCO <sub>3</sub> )	500.00
Fenoles o compuestos fenólicos	0.001
Fierro	0.30
Fluoruros (como F-)	1.50
Manganeso	0.15
Mercurio	0.001
Nitratos (como N)	10.00
Nitritos (como N)	0.05
Nitrógeno amoniacal (como N)	0.50
pH (potencial de hidrógeno) en unidades de pH	6.5-8.5
Plaguicidas en microgramos/l: Aldrín y dieldrín (separados o combinados)	0.03
Clordano (total de isómeros)	0.30
DDT (total de isómeros)	1.00
Gamma-HCH (lindano)	2.00
Hexaclorobenceno	0.01

Heptacloro y epóxido de heptacloro	0.03
Metoxicloro	20.00
2,4 – D	50.00
Plomo	0.025
Sodio	200.00
Sólidos disueltos totales	1000.00
Sulfatos (como SO4=)	400.00
Sustancias activas al azul de metileno (SAAM)	0.50
Trihalometanos totales	0.20
Zinc	5.00

Tabla 4. Límites permisibles de características bacteriológicas. Fuente: Diario Oficial de la Federación., 2000

CARACTERÍSTICA	LÍMITE PERMISIBLE
Organismos coliformes totales	2 NMP/100 ml
	2 UFC/100 ml
Organismos coliformes fecales	No detectable NMP/100 ml
	Cero UFC/100 ml

De acuerdo a los límites mencionados anteriormente, las entidades públicas que se hacen responsables del monitoreo de las aguas residuales, tienen la obligación de registrar y conservar la información resultante del muestreo y análisis de los últimos tres años de acuerdo a la Norma Oficial Mexicana (Reglamento de la Ley de Aguas Nacionales, 2014). Se debe tomar en cuenta que cada Estado tiene señalado leyes dentro de su propia constitución sobre agua residuales y su propio ordenamiento en materia de suministro de agua potable, alcantarillado y saneamiento. Es por esa razón que en este trabajo se hace hincapié en la Ley del Agua para el Estado de Puebla, última reforma publicada en el periódico oficial el 19 de octubre de 2015, que “define y regula de manera clara los servicios de agua potable, drenaje, alcantarillado, saneamiento, reúso y suministro de agua, además establece una estructura tarifaria para el cobro de las mejoras, productos y derechos del mismo”.

## VII. MARCO METODOLÓGICO

### 7.3. Revisiones sistemáticas

Una revisión sistemática se describe como una forma de recopilar, sintetizar y analizar de manera crítica múltiples investigaciones previas, a través de un proceso sistemático (Tranfield *et al.*, 2003).

Se realiza una revisión de la literatura partiendo de una pregunta que se formula de forma clara y objetiva, utilizando métodos sistemáticos para seleccionar e identificar investigaciones relevantes, para contestar y presentar conclusiones objetivas y validas a la pregunta antes planteada (Last, 2001). Utilizadas como método de investigación, proporciona una base sólida para promover el conocimiento y facilitar el desarrollo de la teoría (Webster y Watson, 2002), en donde se integran hallazgos empíricos, generando información que otros estudios interdisciplinarios por sí solo no podrían generar.

Además de ser una forma de sintetizar los hallazgos de la investigación, esta puede ser mostrada en forma de un meta-análisis, englobando y aplicando técnicas de análisis estadístico, descubriendo las áreas en las que se necesita abordar una investigación exhaustiva del tema.

Aunque las revisiones sistemáticas nacieron en el campo de la salud, en años recientes, investigadores se han involucrado en la creación de revisiones en otros campos del conocimiento como en las ciencias sociales y en la ingeniería del software (Petticrew y Roberts, 2005; Kitchenham *et al.*, 2011).

Las revisiones sistemáticas persiguen objetivos importantes como lo son, el proveer evidencia de la literatura científica para poder guiar y dirigir decisiones en futuras investigaciones, resolver la incertidumbre de reportes originales en donde los resultados son contrastantes, reportar la importancia y las fuentes de heterogeneidad, y por último el poder investigar las variaciones de tratamientos en distintas situaciones en diferentes subgrupos (Snyder, 2019).

Se sugieren diferentes tipos de revisiones de la literatura (Aguilera, 2014) como lo son, las revisiones narrativas (RN) que se caracterizan por ser exhaustivas y realizadas por expertos en un tema determinado, sin esclarecer los métodos de búsqueda y selección de la información. Las revisiones sistemáticas (RS), son un tipo de investigación que recopila información orientado a responder una pregunta de investigación y se realizan bajo un diseño establecido (Tabla 5). Además, también se clasifican en cualitativas, las cuales presentan información de forma descriptiva y las cuantitativas las cuales hacen uso de técnicas estadísticas y de igual forma pueden presentar resultados de forma descriptiva.

Las revisiones presentan diferentes enfoques que pueden ser sistemáticos, semi-sistemáticos e integradores, esta última tiene como objetivo evaluar, criticar y sintetizar la literatura sobre un tema, de manera que le permita surgir nuevos marcos teóricos y perspectivas, si se tiene la certeza de que se tiene una precisión en la revisión de la literatura, se podrán identificar diferentes brechas de investigación reales y desarrollar hipótesis y preguntas para mejorar la calidad de las investigaciones en una red científica (Snyder, 2019).

*Tabla 5. Principales diferencias entre revisiones narrativas y sistemática (Rodero, 2014)*

<b>Característica</b>	<b>Revisión Narrativa</b>	<b>Revisión Sistemática</b>
Pregunta de investigación	Amplia, no estructurada	Estructurada, clara y centrada en un problema definido
Búsqueda bibliográfica	No detallada, ni orientada a localizar todos los estudios disponibles. Posibilidad de sesgo	Búsqueda detallada, sistemática y explícita.
Selección de artículos	No hay criterios de selección.	Selección basada en criterios explícitos y aplicación en todos los artículos
Valoración de la calidad de los estudios	No hay valoración	Valoración o evaluación crítica de la calidad metodológica
Síntesis	Resumen subjetivo cualitativo, sin estimador estadístico	Resumen cuantificado por un estimador estadístico
Interpretación	Basada en la evidencia y en opiniones personales	Basada en la evidencia

Dentro de las ventajas de realizar una revisión de la literatura encontramos las siguientes: presentan resultados globales de un tratamiento o la tendencia de riesgo de los mismos, ilustrar el carácter de la relación entre variables, detectar las contradicciones aparentes en los resultados, mejorar la precisión en la estimación y facilitar las decisiones menos subjetivas y reducir sesgos atribuibles al investigador. Los resultados nos permitirán resumir toda la evidencia relacionada a un tema en concreto, lo que permitirá considerar a las revisiones en el primer nivel de la pirámide de los niveles de evidencia (Letelier *et al.*, 2005).

Sin embargo, muchas de las investigaciones en la literatura a menudo caen en errores como la falta de minuciosidad y de enfoque sistemático, y dan como resultados investigaciones con falsos resultados, los cuales se pueden describir como limitaciones o desventajas de las revisiones, también se toman en cuenta la elección de los estudios y su calidad de análisis (Tranfield *et al.*, 2003). Así mismo, la heterogeneidad o variabilidad de los estudios es considerada como una posible limitación por algunos autores, siendo los mismos en caer en errores como el seleccionar evidencia ignorando investigaciones que apuntan hacia otras direcciones. Aunque las revisiones sistemáticas son consideradas como un proceso largo, es relativamente de menor costo que otras investigaciones y con un mayor nivel de impacto (García, 2013).

### **7.3.1. Metodología en las revisiones sistemáticas**

La realización de las revisiones sistemáticas sigue los mismos pasos que un estudio empírico: formulación del problema, búsqueda y codificación de los estudios, análisis estadístico e interpretación (Cooper, 2010).

Estas revisiones deben ser valoradas en relación con la magnitud de los resultados expuestos, así, se pueden encontrar guías de lectura crítica como el programa CASPe, que consiste en plantillas con puntos clave y herramientas para la precisión de los datos, de la misma forma se encuentra la iniciativa QUOROM

específicamente para el metaanálisis y la declaración PRISMA para el reporte de ítems (Urrutia *et al.*, 2005; Moher *et al.*, 2009).

Los métodos con los que se realizan las revisiones sistemáticas se han modificado a lo largo de los años, debido a los aciertos como debilidades en las áreas en las que se desarrolla, los cuales han sido documentados y algunos de los que han tenido mayor aceptación en la comunidad científica se presentan a continuación:

- i. Colaboración Cochrane. Aceptada desde 1993 y conformada por investigadores, profesionales sanitarios, involucradas en áreas de la salud. El proceso cuenta con tres etapas que son, la planeación, ejecución y reporte (Centro Cochrane Iberoamericano, 2012).
- ii. PPSR (Procedimiento para llevar a cabo las Revisiones Sistemáticas), en el que se parte de un procedimiento para la ingeniería de Software, contando de tres etapas, planeación o definición de protocolo, ejecución o identificación de estudios y síntesis o análisis (Kitchenham *et al.*, 2014).
- iii. PRISMA (Elementos de informes preferidos para revisiones sistemáticas y meta-análisis), de reciente creación y constante actualización, contando con cuatro etapas, partiendo de la búsqueda en motores de búsqueda, síntesis cualitativas o cuantitativas, revisión de los estudios y meta-análisis (Hutton *et al.*, 2016).

Una revisión sistemática es similar a una investigación, pero en este caso la población de estudio son los trabajos originales ya publicados, para su realización se siguen los siguientes pasos según Sánchez, 2010 y Snyder, 2019:

- a) Formulación del Problema. Se estructura la pregunta que se desea responder y los objetivos que se desean alcanzar.
- b) Identificación de conceptos y términos de búsqueda. Definiendo los criterios de selección de la información mediante palabras clave y el establecimiento de las bases de datos a ocupar.

- c) Extracción de los datos. Se realiza la recuperación de la información más relevante según los objetivos planteados.
- d) Evaluación de la calidad de los estudios incluidos. Con una valoración de tipo escalas, en la que los estudios reciben una puntuación de acuerdo a la consideración y criterios establecidos del autor, sin olvidar el objetivo del estudio.
- e) Análisis y presentación de resultados. Se realiza una evaluación de cada artículo de investigación con un diagrama de flujo del proceso de selección y una representación gráfica de los resultados y/o análisis estadístico.
- f) Redacción de las conclusiones, las limitaciones y las implicaciones en futuras investigaciones.

#### **7.4. Aspectos teóricos del muestreo incidental o crítico**

Para la consecución del segundo objetivo específico de esta investigación se ha considerado adecuado adentrarse en el estudio del “*muestreo no probabilístico*”. Aunque el muestreo no probabilístico tiende a generar muestras menos precisas y representativas que el muestreo probabilístico, la mayor parte de las muestras de investigación en muchas disciplinas son no probabilísticas (Polit y Hungler, 2000).

Entre los métodos de muestreo no probabilístico puede señalarse el llamado “**muestreo intencional o crítico**”, basado en la primicia de que el investigador hace uso de sus conocimientos del objeto de estudio o de su población para seleccionar el número de casos que incluiría en su muestra. Este tipo de muestreo se aplica cuando se busca una muestra de *expertos*, como es el caso que nos ocupa.

Un *experto* está considerado como una persona experimentada en algo, especializada o con grandes conocimientos en una materia (Diccionario de la Real Academia de la Lengua Española ([die.rae.es/](http://die.rae.es/) diccionario)).

Consultar a este tipo de persona es una práctica bastante desarrollada en los procesos de investigaciones de cualquier estudio en general y esta actividad,

aunque no tiene una regulación oficial, actualmente tiene las calificaciones siguientes:

- Opinión de experto
- Criterio de experto
- Entrevista de experto
- Juicio de experto
- Consulta de expertos

En el Anexo 1 (A) se hace una breve explicación de cómo y dónde se han empleado esas calificaciones o acepciones. En este estudio utilizamos la acepción “**entrevista de experto**”.

Al seleccionar a los expertos se debe tener en cuenta la información que estas pueden tener acerca de los temas investigar; el primer paso es la identificación de las potenciales personas clave que se desea entrevistar, así como de su tiempo disponible, recursos y otras logísticas.

La realización de preguntas con personas clave, con el propósito de obtener información de un grupo de personas, profesionales o residentes, que tienen la experiencia propia del conocimiento y pueden ofrecer la idea de la naturaleza del problema y hacer recomendaciones para las soluciones (Carter y Beaulieu, 1992). Se pueden utilizar dos técnicas: entrevistas vía telefónica y en persona.

Dentro de las ventajas de esta metodología puede señalarse que se puede obtener datos detallados, aumentando el conocimiento. Algunas desventajas son la selección correcta de las personas clave y la generalización de los datos (USAID, 1996).

## **VIII. Materiales y Métodos**

### **a) *Formulación del problema***

La elaboración de este trabajo se enfocó en una revisión sistemática, dentro del enfoque de las revisiones sistemáticas integradoras, que nos permiten mapear los diferentes enfoques o temas teóricos y también permite identificar las brechas dentro de la literatura (Snyder, 2019).

### **b) *Identificación de conceptos y términos de búsqueda***

Se realizó la recopilación bibliográfica e información científica relevante sobre las tecnologías avanzadas de oxidación (POA) en específico de los tratamientos fotoquímicos que incluyen peróxido de hidrógeno y ozono (UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, UV/O<sub>3</sub> y UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/O<sub>3</sub>), así como el uso de la ósmosis inversa aplicadas en México y otros países del mundo para la eliminación de los contaminantes orgánicos y persistentes, así como la remoción de la carga bacteriana en diferentes tipos de aguas residuales de origen industrial, agrícola, municipales y no municipales; esto con la finalidad de poder ser considerados como métodos de descontaminación de las aguas residuales de la ciudad de Puebla.

#### **b.1 *Procedimiento de búsqueda bibliográfica***

Se llevó a cabo una revisión de la literatura en las siguientes bases de datos: Scielo ([www.scielo.org.co](http://www.scielo.org.co)), Redalyc ([www.redalyc.org](http://www.redalyc.org)), NCBI ([www.ncbi.nlm.nih.gov](http://www.ncbi.nlm.nih.gov)), Science Direct ([www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com)), Scopus ([www.scopus.com](http://www.scopus.com)) y Dialnet ([dialnet.unirioja.es](http://dialnet.unirioja.es)). Tomando en cuenta las siguientes palabras clave en el idioma español e inglés: aguas residuales(wastewater), ósmosis inversa (reverse osmosis), tratamiento de aguas residuales (wastewater treatment). Limitando a la última década de publicación: 2010-2021. La información seleccionada fue tomada de artículos científicos dando prioridad a investigaciones experimentales.

Durante la revisión bibliográfica se utilizaron las palabras clave antes mencionadas, añadiendo a la búsqueda las siguientes palabras en idioma español e inglés: UV /peróxido de hidrógeno (UV/hydrogen peroxide), (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/UV), UV/ ozono (UV/ Ozone) (O<sub>3</sub>/UV), UV/ peróxido de hidrógeno/ozono (UV/Hydrogen peroxide/ Ozone) (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/O<sub>3</sub>/UV) procesos avanzados de oxidación (Advanced oxidation process), contaminantes emergentes (emerging pollutants), UV/ agua residual (UV/Wastewater treatment).

### ***c) Extracción de los datos.***

Para el cumplimiento de los objetivos planteados, durante la preselección de la bibliografía se tomaron los siguientes criterios: 1) documentos que contenían los puntos de interés, 2) artículos locales e internacionales, 3) tipos de aguas residuales, 4) tipo de tratamiento aplicado, 5) resultados positivos y negativos del uso de los tratamientos y su constante actualización. Se excluyeron trabajos que trataran con tratamientos de UV con otros componentes que no fueran los estudiados en este trabajo.

Mediante una valoración tipo escalas y con base en el trabajo realizado por Jurado en 2017, en la que un estudio recibe una puntuación de acuerdo a la consideración del autor y sin olvidar el objetivo del estudio; a cada artículo se le asignó un criterio de selección y un valor de puntaje de acuerdo a su relevancia para este estudio, para el caso de artículos con mayor interés se les asignó un puntaje máximo de 1.5 y de 1 para artículos que cumplieran con solo algún criterio descrito (Tabla 6). Posteriormente, en cada artículo se realizó una suma de estos puntajes para cada criterio descrito, así, artículos con valor de resultado de 4 o 5 se consideraron de importancia para este trabajo.

Tabla 6. Valor de relevancia para selección de artículos

<b>Criterio No.</b>	<b>Descripción</b>	<b>Puntaje máximo</b>
1	Estudios de aguas residuales de ríos y plantas de tratamiento.	1.5
2	Estudios de aguas residuales utilizando aguas simuladas en laboratorio.	1
3	Estudios que realizan tratamientos con solo uno de los procesos fotoquímicos (UV/H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> y UV/O <sub>3</sub> ) y de ósmosis inversa. Con el objetivo de eliminar contaminantes orgánicos o persistentes y bacterias presentes.	1
4	Estudios que utilizan ambos procesos fotoquímicos (UV/H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> /O <sub>3</sub> ) con el objetivo de eliminar contaminantes orgánicos o persistentes y bacterias presentes.	1.5
5	Estudios con metodologías experimentales y resultados tratados estadísticamente.	1.5

**d) Evaluación de la calidad de los estudios incluidos**

Después de la preselección de los artículos que contenían alguno de los criterios antes mencionados para su revisión y su posterior asignación de utilidad para este trabajo, se efectuó una siguiente fase de análisis.

Se realizaron estudios de tipo univariado y multivariado para la comparación del uso y frecuencia de las principales técnicas fotoquímicas de descontaminación (UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, UV/O<sub>3</sub> y UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/O<sub>3</sub>) y su utilidad en la eliminación de la carga bacteriana, contaminantes orgánicos y emergentes, así como su porcentaje de utilización en nuestro país y en el mundo.

De acuerdo a los criterios y puntajes asignados de la tabla 6, se realizó el cálculo del porcentaje de los artículos que responden a cada uno de los criterios, según lo propuesto en las revisiones sistemáticas por Gómez *et al.*, sobre sistemas eólicos para micro-generación (2014) y Jurado (2017) sobre las técnicas para la evaluación de la calidad del agua de ríos contaminados; esto para la integración y la mejora de comprensión de la información que se obtiene de la revisión de los artículos científicos.

Primero, se calculó el promedio de los criterios utilizando la ecuación siguiente:

$$PAA\%(n) = \left( \frac{T}{TA} \right) \cdot 100$$

Donde:

PAA% es el porcentaje de artículos preseleccionados que responden al criterio de selección n-simo.

T: es el total de artículos preseleccionados que responden al criterio de selección n-simo

TA: es el total de artículos preseleccionados

n: es el número de criterios de selección (1,2,3 o 4)

Seguidamente, se calculó el promedio de los porcentajes utilizando la ecuación:

$$APPA\% = \frac{PPA\%(1) + PPA\%(2) + \dots + PPA\%(n)}{TC}$$

Donde:

APPA% es el promedio de porcentajes de preguntas o criterios de selección

PAA%(n): es el porcentaje de artículos que responden a las preguntas o criterio de sección n-simo.

TC: es el total de preguntas o criterios de selección.

Por último, se dividió el promedio de los porcentajes entre 3, con la finalidad de obtener un porcentaje de quiebre, mínimo o límite, utilizando la ecuación siguiente:

$$MAPAA\% = \frac{APPA\%}{3}$$

Donde:

MAPAA% es el porcentaje de quiebre, mínimo o límite

APPA% es el promedio de porcentajes de preguntas o criterios de selección.

### **e) Análisis estadístico**

Las técnicas estadísticas de reducción de dimensión, son recomendadas para extraer la información más importante que subyace en el fenómeno bajo estudio. Como es bien conocido, el Análisis de Componentes Principales (ACP) busca la reducción de un conjunto original de variables cuantitativas, que están correlacionadas, transformándolo en un nuevo conjunto de componentes mas pequeñas pero que no estas correlacionados, representando la mayor parte de la información de las variables originales. Una extensión del ACP es la técnica de Análisis de Correspondencia Múltiples (ACM) que se utiliza cuando el conjunto original de variables es de tipo cualitativo, como es el caso que nos ocupa.

A partir de la revisión sistemática, se continuo a realizar la selección de las variables más importantes que fueron: tipo de tratamiento, remoción de contaminantes, carga bacteriana y tipo de efluente tratado; debido a las características de las variables, se realizó un análisis ACM con el programa estadístico SPSS (versión 12.0) y MInITAB® 17 (versión 17.1.0). Para lo cual, se utilizaron diferentes codificaciones (Tabla 7) para establecer una caracterización de todos los documentos estudiados.

Una vez realizada la codificación, se procedió a dar un puntaje a cada uno de los cien artículos revisados, se le asignó un código de cada categoría o variable, dependiendo de la clasificación anteriormente mencionada; es decir al artículo número uno se le asignó un código que dependía del tipo de tratamiento que se aplicó, el tipo de contaminante a eliminar y si consideraba la eliminación de bacterias. Una vez que se obtuvo la codificación los datos fueron tratados estadísticamente.

Tabla 7. Codificaciones de clasificación para el análisis multivariado

Clasificación	Código	Descripción
<b>Tratamientos</b>	1	UV/H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>
	2	UV/O <sub>3</sub>
	3	UV/H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> /O <sub>3</sub>
	4	Ósmosis inversa
<b>Remoción de contaminantes</b>	1	Considera contaminantes orgánicos
	2	Considera contaminantes emergentes
<b>Carga bacteriana</b>	1	No considera causa enfermedad
	2	Considera que causa enfermedad
<b>Tipo de efluente</b>	1	Considera ríos
	2	Considera PTAR
	3	Considera otros efluentes
	4	Aguas simuladas en laboratorio

### 8.1. Opinión de expertos en aguas residuales

En una última fase de búsqueda de información, se realizaron una serie de preguntas a especialistas: el primer experto (E1) del laboratorio de química ambiental en la línea de investigación del tratamiento de sistemas acuosos por medio de procesos fotoquímicos del Instituto de Ciencias de la BUAP (ICUAP); el segundo experto (E2) miembro de la Facultad de Ciencias Biológicas de la BUAP con conocimientos sobre los indicadores biológicos de contaminación y reparación de sistemas acuáticos.

La formulación de las preguntas se realizó de acuerdo con la especialidad de cada investigador y a los objetivos planteados en este trabajo, donde se tomaron en

cuenta aspectos sobre las causas de la contaminación de los efluentes en Puebla, su posible tratamiento y el uso de los procesos fotoquímicos en la zona, así como las posibles implicaciones de las políticas públicas en el Estado, dando como resultado cuatro preguntas para cada investigador. Las preguntas realizadas se encuentran en el anexo 1.

Los investigadores fueron contactados de primera instancia en forma de correo electrónico, dada las circunstancias de la actual pandemia por COVID-19 y se optó por una entrevista de manera virtual. El primer experto se encuentra radicando actualmente en Alemania y aceptó contestar a la entrevista por medio de correo electrónico, sus respuestas fueron analizadas y archivadas. Al segundo experto se le realizó la entrevista de manera virtual y sus respuestas fueron grabadas con su permiso para su posterior análisis y difusión.

Las respuestas fueron analizadas y comparadas de acuerdo a los resultados obtenidos de la revisión sistemática y de la aplicación del Análisis de Componentes Principales.

Todo esto, para obtener una perspectiva más completa del comportamiento de las aguas residuales del estado de Puebla y del conocimiento o la posible implementación de los procesos fotoquímicos para su remediación.

## **IX. RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

Los resultados de este estudio se dividieron en dos partes, por un lado, se describieron los datos obtenidos en la revisión sistemática, por otra parte, se presentan los argumentos de los expertos en temas de aguas residuales en Puebla. A continuación, se exponen los resultados de la metodología utilizada en la revisión sistemática.

### **9.1. (c) Selección bibliográfica**

Como resultado del paso (c) de la metodología propuesta por Snyder, la búsqueda bibliográfica arrojó un total de 150 documentos, mayormente centrados en el reporte de la eficiencia de los procesos fotoquímicos que incluyen peróxido de hidrógeno (UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) y ozono (UV/O<sub>3</sub>), así como los resultados de la degradación de diferentes contaminantes orgánicos y persistentes (Fig. 4). Se excluyeron 50 artículos que no cumplían con los criterios de selección, es decir, artículos de revisión, tesis de posgrado, resumen de conferencia y la inclusión de otros tratamientos ajenos a los estudiados. La base de datos quedó constituida por un total de 100 artículos (ver anexo 2) que cumplieron con los criterios mínimos de selección y fueron utilizados para su análisis estadístico (descritos en la tabla 8).

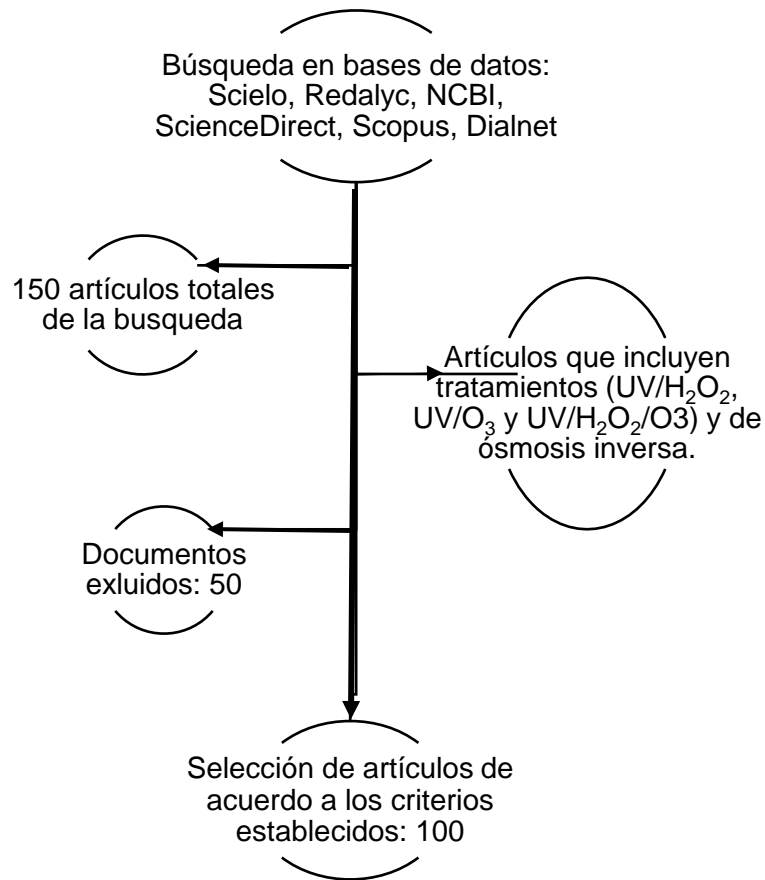


Figura 4. Diagrama de selección de documentos de interés

### 9.1.1. (d) Análisis bibliográfico

En la última década se han reportado un gran número de estudios sobre los tratamientos fotoquímicos que incluyen peróxido de hidrógeno y ozono o la combinación de ambos ( $H_2O_2/O_3$ ), en lo que los autores concuerdan, dado que se ha reportado que la utilización de la radiación ultravioleta es rentable para sistemas de tratamiento de aguas dado que no produce residuos tóxicos, el tiempo de contacto es corto y con equipos relativamente sencillos de operar (Grijalva *et al.*, 2020; Quintero, 2017; González *et al.*, 2013). Se realizó un análisis de la cantidad de artículos que se encontraron por año y país (Fig. 5) y (Fig. 6) respectivamente, reportándose solamente los países con un número de artículos superior a uno.

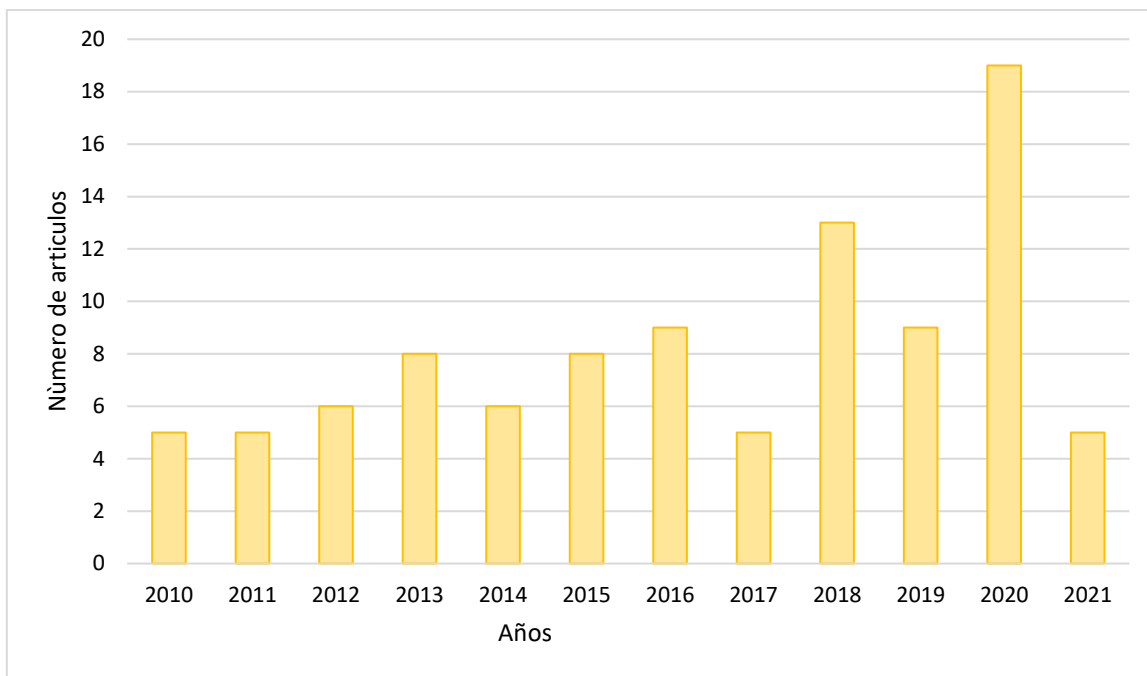


Figura. 5. Número de publicaciones en los últimos años, Fuente: Amaro, 2021

En cuanto a los países, se destaca un número mayor de publicaciones en China, seguido de países en Latinoamérica como Colombia y Brasil; esto debido a que este país asiático se considera como uno de los sectores más grande de aguas residuales en donde a lo largo de las últimas décadas ha dedicado esfuerzos en su capacidad de tratamiento e innovación a nivel mundial con costos accesibles y con el menor impacto ambiental en los ecosistemas (Qu *et al.*, 2019).

También se debe mencionar que algunos países europeos mantienen plantas de tratamientos de aguas residuales que invierten en tecnologías para el mejor control de los procesos, uso menor de electricidad y la disminución de la emisión de gases de efecto invernadero, según la Agencia Europea del Medio Ambiente (AEMA), sería necesario una mayor inversión en las plantas de tratamientos para que sean aptas para los desafíos del cambio climático y la presencia de microcontaminantes (Moral *et al.*, 2019). Entre otras razones, se podría estar justificando que diversos países, europeos y asiáticos no reporten la utilización de los procesos fotoquímicos dado que estos se dedican a invertir en nuevas tecnologías y plantas de

tratamientos que cumplan con sus necesidades, no siendo así el caso para países en desarrollo en los que los procesos de tratamiento de agua residual requieren de suministros de electricidad constante y una gestión de política pública que permita la utilización, diseño y el financiamiento de las nuevas tecnologías que se han estado desarrollado, por lo que países como en Latinoamérica optan por tecnologías que reducen los costos de producción.

De acuerdo con los años de publicación se nota una tendencia de los últimos cinco años (2015) a la fecha en el uso y actualización de los tratamientos fotoquímicos como una alternativa para el tratamiento de aguas residuales, siendo el año 2020 con el mayor reporte de su implementación. Se podría deducir que el uso de estos tratamientos es una tecnología eficiente en la degradación y poseen diversas aplicaciones en diferentes sectores, sin embargo, una desventaja es que se necesita personal capacitado para el manejo de los equipos de tratamiento (Quintero, 2017) lo que podría estar justificando que los países donde más se reportan su uso sean en China.

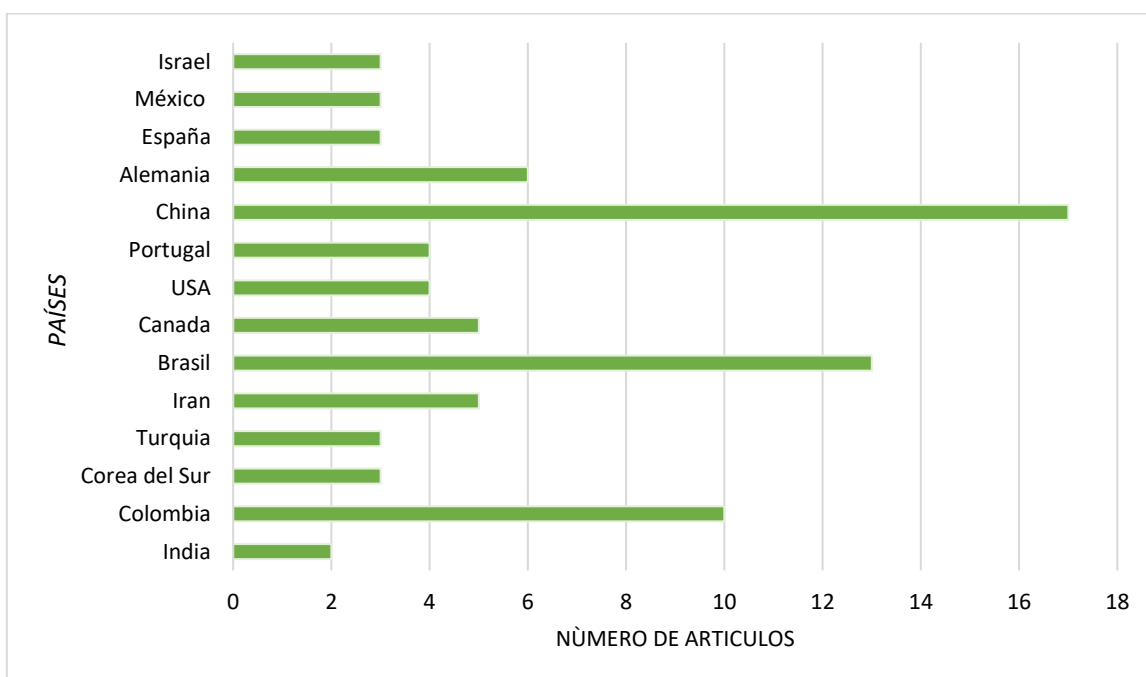


Figura 6. Artículos reportados por país, Fuente: Amaro, 2021

De los 100 artículos, se encontró una tendencia a la mayor utilización de los procesos fotoquímicos utilizando peróxido de hidrógeno con un total de 48 artículos (Figura 7), así mismo la utilización de la combinación de ambos procesos (UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/O<sub>3</sub>) reporto un total de 32 artículos, no siendo el mismo caso para los procesos con ozono y de ósmosis inversa con solo 10 artículos respectivamente; esto debido a que en los procesos de ozono la tasa de degradación es casi siempre proporcional a la concentración de la cantidad de ozono implementada y donde se hace evidente una influencia a pH mayores a 8 y en caso de medios básicos, la utilización tanto del ozono como el del peróxido de hidrógeno muestran comportamientos diferentes de degradación (Forero *et al.*, 2005); además de que los procesos con peróxido de hidrógeno y UV son ampliamente conocidos por diversos investigadores para la mejor eliminación de materia orgánica (González *et al.*, 2013).

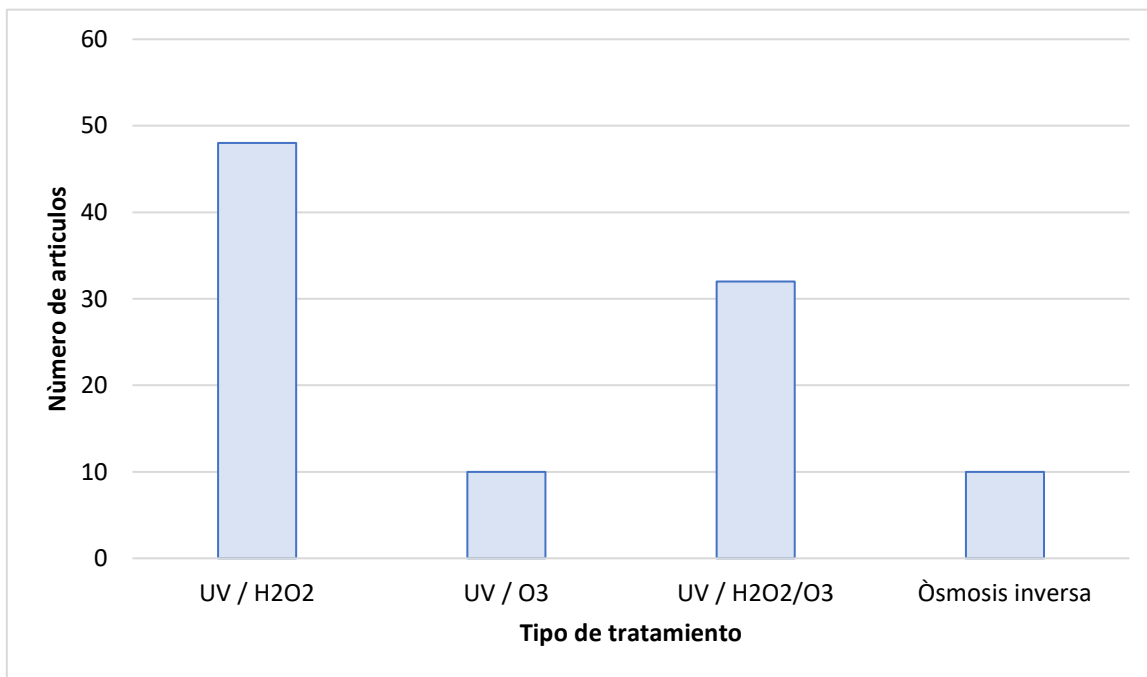


Figura 7. Tendencia del uso de tratamientos fotoquímicos, Fuente: Amaro, 2021

Sin embargo, como menciona Grijalva *et al.*, (2020), se han reportado desventajas sobre la utilización de estos tratamientos (UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) y es que debido a la composición del agua no se pueden ocupar con altos niveles de sólidos suspendidos, turbiedad, color o materia orgánica, dado que estas sustancias pueden reducir o absorber la radiación ultravioleta y la eficacia de desinfección.

Los tratamientos UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> como lo mencionan diversos autores, debe tener una atención mayor en cuenta a la cantidad de dosis del reactivo, dado que tiene una baja absorptividad molar e indica cuanta luz es absorbida a una longitud de onda específica, es decir, se requieren concentraciones altas de reactivo de peróxido de hidrógeno para una oxidación de los contaminantes eficiente (Xu *et al.*,2016).

De la misma manera, se realizó una clasificación de los trabajos publicados y las diferentes matrices acuosas que se utilizan (figura 8), dando como resultado el mayor uso de aguas simuladas en el laboratorio para su tratamiento con procesos fotoquímicos, además, se reporta que la mayoría de los contaminantes tratados fueron contaminantes emergentes y sus derivados. Aunque se esperaba que los reportes fueran en su mayoría sobre los contaminantes orgánicos, debido a que estos interaccionan con los radicales hidroxilos por tres mecanismos que hacen posible su eliminación (Sillanpää, 2015). Además, el aumento en el reporte de los contaminantes emergentes se debe principalmente a las crecientes cantidades de estos compuestos en las fuentes de agua y a que otros procesos de desinfección comúnmente aplicados no las pudieron eliminar (Sillanpää, 2018).

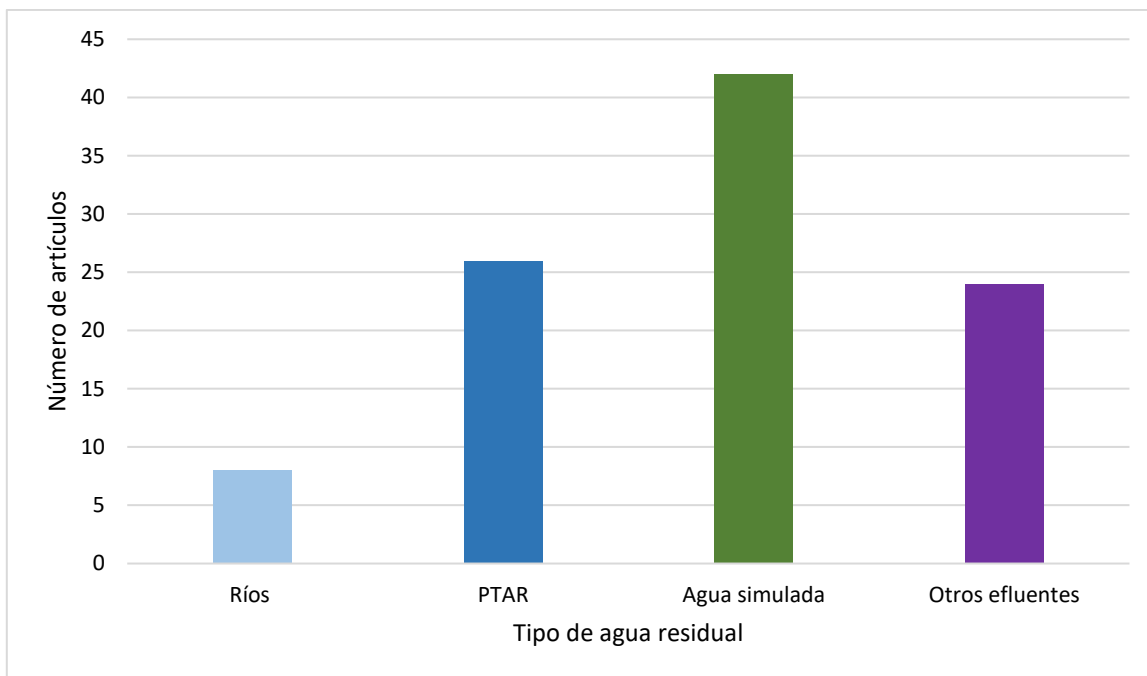


Figura. 8. Tendencia del tipo de agua residual empleada, Fuente: Amaro, 2021

### 9.1.2. (d) Evaluación de la calidad de los estudios incluidos

La tabla 8 muestra 25 documentos que obtuvieron puntajes máximos de selección (4-5 puntos) cada uno con su puntaje asignado según los criterios establecidos en la tabla 6, el tratamiento fotoquímico aplicado y el tipo de agua residual tratada.

De los artículos seleccionados, 5 de ellos corresponden al año 2020 de publicación, seguidos de los años 2014, 2018 y 2019 con 4 artículos reportados. La metodología de las revisiones sistemáticas, obtiene resultados en los que se indican pequeños saltos entre los reportes sobre la utilización y/o eficiencia de los tratamientos fotoquímicos (UV / H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/O<sub>3</sub>) durante los últimos años; pero al mismo tiempo, se toma en cuenta una de las desventajas de las revisiones sistemáticas, en donde la selección de los reportes de investigación debe tener varios aspectos de interés como sea posible y al mismo tiempo las decisiones respecto al idioma de publicación y el tipo de revista del cual es tomado el artículo, en donde al omitir algún estudio se podría estar generando un sesgo de la muestra seleccionada y que podría no ser representativa (Tranfield *et al.*, 2003).

Se observa que los puntajes más altos fueron obtenidos por los estudios que utilizaron la combinación de tratamientos de peróxido de hidrógeno y ozono (UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/O<sub>3</sub>), mostrando valores de su eficiencia de 80 – 100% en la eliminación de diversos contaminantes como fármacos, fenoles, tóxicos de petróleo, entre otros y en algunos casos la inactivación de bacterias. Solamente dos artículos con tratamiento UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> lograron obtener puntajes de 4.5 y 5 respectivamente y ser considerados para su análisis.

La utilización de ozono y peróxido de hidrógeno (UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/O<sub>3</sub>) es un tratamiento sobresaliente y da como resultado una degradación rápida y completa de los contaminantes de las aguas residuales (Hassanshahi y KarimiJashni, 2018); lo cual se produce por una descomposición activa del ozono en presencia del peróxido de hidrógeno y como resultado se obtiene una mayor producción de •OH (Kurt *et al.*, 2017).

Una de las posibles desventajas es el alto costo de estos tratamientos en aplicaciones a gran escala, el cual variara de acuerdo a varios factores, como la concentración y el tipo de contaminante, el flujo del agua y el grado de purificación que se busca (Cuerda *et al.*, 2020)

Además, dos artículos que tienen la utilización de los procesos fotoquímicos más la implementación de ósmosis inversa obtuvo los puntajes mínimos de selección, concluyendo una degradación del 48% de los contaminantes. Sin embargo, investigaciones que se han realizado en los últimos años, reportan en relación de factibilidad de costos y consumo energético, que la ósmosis inversa, requiere un menor consumo energético, lo que presenta una ventaja sobre el resto de los procesos, además se puede utilizar en agua salobre como la de mar (Grijalva *et al.*, 2020) y se reporta que el uso de un solo tratamiento POA reduce significativamente los contaminantes, pero los costos y energía consumida son mayores, lo que no ocurre cuando se utilizan los tratamientos UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/O<sub>3</sub> dado que son considerados tratamientos rentables que consumen menos energía y una mayor reducción de contaminantes (Surbhi Tak *et al.*, 2020).

Así mismo, estos artículos reportan el mejoramiento en la eliminación de contaminantes cuando los tratamientos son utilizados en conjunto y no de manera separada, en tiempos relativamente cortos que van desde los 30 min de radiación hasta los 8 min de exposición a los tratamientos. En relación al uso del peróxido de hidrógeno, se recomendó su aplicación en medios básicos en donde se observa que en los primeros 60-80 min de reacción la cantidad de peróxido aplicada a la muestra, afecta la velocidad de reacción. Además, la eficiencia en promedio mejorará cuando se utiliza el doble de este reactivo, por lo cual se reduce a la mitad el consumo, lo que hace de este proceso (UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) sea económicamente atractivo que la utilización del ozono (Forero *et al.*, 2005).

Así para el tratamiento UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, se reportan degradaciones bajas con un pH cercano a neutro y a pH ácidos una mayor eliminación de carbono orgánico total (COT), por lo que se recomiendan estudios sobre este parámetro, dado que es un factor complejo dentro de la variedad de constituyentes de las interacciones en los procesos de oxidación (Liao *et al.*, 2001). Se ha reportado en otras investigaciones que el pH inicial de las muestras tiene un papel importante en la degradación de contaminantes orgánicos (Feng *et al.*, 2021; Wang *et al.*, 2019), siendo así que niveles de pH bajos o altos perjudican la mineralización de los compuestos orgánicos (Feng *et al.*, 2021).

Siendo un factor importante en este tratamiento la concentración de los contaminantes, por ejemplo, investigaciones sobre la eficiencia de degradación de colorantes reportan resultados similares, al concluir que la tasa de decoloración de los tintes disminuye cuando el número de moléculas de colorante aumenta y no la concentración de radicales •OH (Basturk y Karatas, 2015; Rubio *et al.*, 2017; Pourgholi *et al.*, 2018; Jaramillo *et al.*, 2019).

La eliminación de microcontaminantes por tratamientos con UV/O<sub>3</sub> y UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> son eficientes hasta un 98% y pueden ser utilizados para la reutilización de agua potable indirecta de efluentes de aguas residuales municipales (Seo *et al.*, 2019), también se ha reportado la degradación de fármacos con procesos UV, en donde la variación de la cantidad del pH y de peróxido dan como resultado diferentes porcentajes de

eliminación de los fármacos (Giri *et al.*, 2011); de la misma manera se realizan estudios de degradación de tintes en donde la cantidad de peróxido administrada es la que más influye en la degradación de los contaminantes (Arslan *et al.*, 2018).

De acuerdo con estudios recientes sobre los tratamientos con UV/O<sub>3</sub>, la formación de subproductos generados y los costos elevados son limitaciones de la aplicabilidad del ozono para tratamientos a gran escala, en donde investigaciones futuras se deberían tratar puntos como la biodegradabilidad de la dosis de ozono y así como su tiempo de exposición del tratamiento, sean amigables con el medio ambiente con el objetivo de evitar los efectos negativos que este tipo de tratamientos pudieran generar (Hussain *et al.*, 2020). Además, el proceso con ozono contribuye a la inhibición del crecimiento de algas y hongos en las aguas superficiales y es considerado benéfico para la mitigación de la contaminación por fármacos (Jaime y Vera, 2020).

Se debe tomar en cuenta la terminología que se aplica en la evaluación de estos tratamientos, al utilizar palabras como “eficacia” y “eficiencia”, los cuales difieren en el sentido que esta última hace referencia a una mejor utilización de los recursos que se emplean y los resultados que se obtienen, sin embargo, la eficacia busca alcanzar objetivos sin importar si se le ha dado un mejor uso de los recursos (Real Academia Española). Por lo que es importante reconocer la diferenciación de esta terminología y conocer la importancia del funcionamiento de los tratamientos de aguas residuales en términos de su eficiencia, de lo cual se han encontrado diversos trabajos en donde se reporta la eficiencia de la capacidad de remoción de contaminantes, tomando en cuenta la tecnología existente (Hernández *et al.*, 2007).

En cuanto al tipo de agua tratada, la mayoría de los artículos en general se reportan que la descontaminación de aguas residuales naturales, provenientes de diferente origen la industria no es sometidas a un tratamiento, por lo que diferentes grupos de investigación señalan la importancia de realizar estudios químicos, físico-químicos, toxicológicos, para evaluar el estado de los sistemas lóticos (Silva, 2015).

En la tabla también se nota que, en los tipos de aguas tratadas, destacan aguas de la industria farmacéutica y de hospitales en las que destaca que en su tratamiento

es común la combinación de procesos UV, aunque existen estudios que reportan el empleo de ozono como único tratamiento al ser un desinfectante eficaz de patógenos y virus en las aguas residuales, además de un tratamiento económicamente viable para la eliminación de antibióticos y otros contaminantes orgánicos (Aracil *et al.*, 2016). Sin embargo, reportes de la eliminación de fármacos, sugieren que la alcalinidad de las aguas reduce la eficiencia de eliminación de determinados fármacos, debido a que se obstaculiza la producción de radicales  $\bullet\text{OH}$  (Hajar *et al.*, 2020).

De acuerdo con los artículos estudiados, destacan diferentes aplicaciones de los tratamientos UV-POA que van desde la eliminación de productos farmacéuticos, compuestos orgánicos, tanto en agua tratada como de efluentes naturales, sin embargo, en varios casos no se toma en cuenta que algunos contaminantes orgánicos no se mineralizan completamente y estos solo se oxidan parcialmente formando productos de transformación (TP) (Wang *et al.*, 2018). Estos productos, que, aunque se encuentren en bajas concentraciones pueden dañar a los organismos vivos que entran en contacto con ellos, además de perjudicar la salud de las personas, a los ecosistemas y no permiten el eficiente funcionamiento de los tratamientos UV (Barbosa *et al.*, 2016). Por último, se debe prestar atención a los subproductos de las aguas tratadas en donde se observan concentraciones de otros tipos de microcontaminantes orgánicos y materia orgánica disuelta (DOM) resultantes en los efluentes de las plantas de tratamientos de aguas residuales (Prasse *et al.*, 2015).

Aunque los estudios con tratamientos fotoquímicos han proporcionado resultados favorables de su utilización, uno de mayores desafíos de estas tecnologías son los costos específicos, es decir, el volumen de efluente tratado contra la masa del contaminante eliminado, en comparación con otras tecnologías de tratamientos. Por esta razón se deben tomar en cuenta diversos aspectos que reduzcan los costos, como por ejemplo el diseño específico para la eliminación de ciertos microcontaminantes, desinfección de efluentes previamente tratados, el desperdicio de compuestos como agentes oxidantes, catalizadores entre otros, y la utilización

de fuentes de energía renovable para su funcionamiento o como agente activante de los radicales en estos procesos (Dewil *et al.*, 2017)

Tabla 8. Aplicación de los tratamientos fotoquímicos en diferentes tipos de agua residual.

<b>Tratamiento fotoquímico</b>	<b>Tipo de agua residual</b>	<b>Eficiencia del tratamiento</b>	<b>Puntaje</b>	<b>Referencia (Anexo 2)</b>
UV / H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> /O <sub>3</sub>	Río Yamuna con aguas residuales	Eficaz en la degradación de precursores de trihalometanos (THM) en aguas residuales con 12 min de tratamiento.	4.5	Surbhi [83]
UV / H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> /O <sub>3</sub>	Agua potable y efluentes de aguas residuales	Filtros UV fenólicos y olefínicos eliminados de manera eficiente mediante el tratamiento con O <sub>3</sub> con dosis específicas de <0.5 mg O <sub>3</sub> /mgDOC para una eliminación ~100%.	4.5	Seo [80]
UV / H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> /O <sub>3</sub>	Aguas residuales municipales terciarias	El proceso UV / H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> /O <sub>3</sub> un método eficiente contra microcontaminantes.	4.5	Piras [24]
UV / H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> /O <sub>3</sub>	Aguas grises	La mayor remoción de DQO en el proceso fue del, 92%.	5	Hassanshahi [37]
UV / H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	Aguas residuales de lavandería hospitalaria	Las eficiencias medias de eliminación de DQO y tensioactivos fueron 60,3% y 98%, respectivamente. Sin embargo, el tratamiento no fue eficaz para reducir el color y la turbidez.	5	Souza [82]
UV / H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> /O <sub>3</sub>	Agua proveniente de los procesos de endulzamiento de nafta	UV / H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> incrementa la velocidad de degradación del fenol (150-200%). UV / H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> /O <sub>3</sub> es un proceso muy eficiente para degradar los compuestos orgánicos tóxicos de las aguas residuales de la refinación de petróleo.	4.5	Rios [72]
UV / H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> /O <sub>3</sub>	Aguas residuales industriales de alquilbenceno	Una reducción máxima en TCOD fue de 58, 53, 51 y 49%, respectivamente para los procesos UV / H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> /O <sub>3</sub> , UV / O <sub>3</sub> y UV / H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> . Tiempo de reacción de 180 min.	4.5	Zangeneh [33]

UV / H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> /O <sub>3</sub>	Aguas residuales agroindustriales	Eliminación de carbono orgánico total (TOC) del 99%. Puede ser ocupada en riego de acuerdo con los límites legales.	5	Amor [4]
UVc/ O <sub>3</sub> / H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> UVc/ H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> y O <sub>3</sub> / H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	Aguas residuales de la acuicultura	Inactivación del 100% de bacterias presentes con UVc/ O <sub>3</sub> / H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> y UVc/ H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> , requiriendo 20 y 80 min para la inactivación de <i>Vibrio spp.</i> y bacterias cultivables totales, respectivamente.	4.5	Chávez [18]
UV/ H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> y Osmosis inversa	Agua residual PTAR	48% de eliminación de BPA. La eficiencia de rechazo de la membrana varió del 60% al 84%.	4.5	Moreira [62]
UV / H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	Planta de tratamiento de agua de Sanandaj	El aumento de la concentración de H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> , el tiempo y la disminución de la concentración inicial, incrementó la eficiencia de eliminación de TOC.	5	Rezaee [71]
UV / H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> /O <sub>3</sub>	Planta de tratamiento de lixiviados	Eficiencia de eliminación de lixiviados en equipos de DQO, TOC y color,	4.5	Hua-wei [42]
UV / H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> /O <sub>3</sub>	Agua subterránea	La formación de bromato, un subproducto de la ozonización potencialmente cancerígeno, podría reducirse significativamente.	4.5	Lee [50]
UV / H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> /O <sub>3</sub>	Aguas residuales del campo de gas	Logro la degradación de la mayor parte de la materia orgánica de ML-GFW (aguas residuales de los campos de gas)	4.5	Feng [27]
UV / H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> /O <sub>3</sub>	Planta de tratamiento PTAR	Se logró la eliminación completa de gemfibrozil y un máximo del 80% de eliminación de ibuprofeno utilizando una dosis de ozono de 1,5 mg / L	4.5	Hajar [35]
UV / H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> /O <sub>3</sub>	Planta piloto de tratamiento de aguas residuales	Eliminación eficaz de los TOC, que varía entre el 21% y más del 99% de degradación.	4.5	Kaplan [46]
UV / H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> /O <sub>3</sub>	Aguas residuales que se producen en la central eléctrica del sur de Bagdad	20 min fue el mejor tiempo de exposición con porcentajes de remoción de 89.79%, 83.33% y 70% para aceite, DQO y TOC, respectivamente.	4.5	Jasim [45]

UV / H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> /O <sub>3</sub>	El lago Zuñich y el lago Greifensee El efluente de aguas residuales de Dübendorf (Suiza) Lago Jonsvatnet (Noruega)	El uso de O <sub>3</sub> /H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> aumentó la tasa de transformación de micro contaminantes y redujo la formación de bromato en un 70%	4.5	Katsoyiannis [47]
UV / H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> y ósmosis inversa	Agua salobre	La formación de biopelículas microbianas después del pretratamiento con UV / H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> fue significativamente menor que las obtenidas después de los pretratamientos de control y UV.	5	Lakretz [49]
UV / H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> /O <sub>3</sub>	Agua textil	En 240 minutos de tiempo de irradiación, todo el color se eliminó utilizando una dosis de H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> al 1% y la eliminación de DQO fue del 78,4%.	4.5	Pereira [66]
UV / H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> /O <sub>3</sub>	Agua textil	UV / H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> /O <sub>3</sub> con 30 minutos de duración, fue el método más efectivo. UV / H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> duración de tiempo en 10 minutos era el método menos eficaz.	4.5	Pourgholi [69]
UV / H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> /O <sub>3</sub>	Aguas de industria farmacéutica	Sin la aplicación de factores adicionales, el proceso no es muy efectivo, transfiriendo el destino de los antibióticos al medio ambiente	5	Biñ [12]
UV / H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> /O <sub>3</sub>	Aguas residuales hospitalarias crudas	Eficaz para la eliminación de DQO. Se encontró que la interacción entre la concentración de O <sub>3</sub> y la dosis de H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> es el factor más importante que afecta el desempeño del proceso	5	Arslan [6]
UV / H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> /O <sub>3</sub>	Agua de mar	Produce niveles altos de inactividad.	4.5	Huang [40]
UV / H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> /O <sub>3</sub>	PTAR	Eficiencias de eliminación >85% para 20 de 21 micro contaminantes orgánicos. bacterias ( <i>E. coli</i> y <i>enterococos</i> ) disminuyeron a valores inferiores a los niveles permitidos para agua potable, incluso si se almacena durante 3 días.	4.5	Gorito [31]

El interés e implementación en los procesos fotoquímicos utilizados para la descontaminación de las aguas residuales ha incrementado de forma gradual, de tal manera que hasta la década de los noventa la comunidad científica ha demostrado sus beneficios en los temas de descontaminación y se plantea con mayor énfasis la opción de utilizar estos procedimientos (Blanco *et al.*, 2001) es

importante emplear nuevas estrategias que faciliten la mejor comprensión e integración de la información, durante la última década se han desarrollado esfuerzos para lograr tal objetivo, estos se basan en técnicas estadísticas, de modelación, algoritmos y matrices (González y Taborda, 2015; Codina, 2017; Casas Jimenes, 2017 ), en la tabla 9 se presentan los porcentajes calculados de acuerdo a Jurado (2017) con el fin de identificar las oportunidades de investigación en relación a los procesos fotoquímicos (UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, UV/O<sub>3</sub>, UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/O<sub>3</sub>) de acuerdo a la importancia que se asignó a los criterios o variables planteados en esta investigación.

Según lo propuesto por Gómez *et al.*, (2014) primero se obtiene el promedio general de los cuatros criterios (PAA%) (tabla 9), seguidamente se obtiene el promedio de los porcentajes PAA% que es igual a APPA% (76%) por último, a este porcentaje se le dividió entre 3 para obtener el porcentaje de quiebre (MAPAA%) y se obtuvo un resultado del 25%.

De acuerdo a los estudios anteriormente mencionados, si algún valor del porcentaje de artículos preseleccionados (PAA%) es menor que el valor del porcentaje de quiebre (MAPAA%), se revela una oportunidad de investigación no abordada por la literatura con los criterios señalados.

*Tabla 9. Porcentajes calculados para la identificación de vacíos de identificación.*

<b>Indicador</b>	<b>Valor calculado</b>			
<b>PAA%</b>	C1= 100%	C2=65%	C3=40%	C4=100%
<b>APPA%</b>	76%			
<b>MAPAA%</b>	<b>25%</b>			

*Donde: PAA% es el porcentaje de artículos preseleccionados que responden al criterio de selección  
 APPA% es el promedio de porcentajes de preguntas o criterios de selección  
 MAPAA% es el porcentaje de quiebre, mínimo o límite*

Con base a los resultados de porcentaje (PAA% > MAPAA%) se establece que, respecto a los procesos fotoquímicos y a los criterios establecidos en esta investigación y a los reportes científicos estudiados, que se ha desarrollado investigación respecto al tema de interés, sin embargo, destaca la necesidad de desarrollar trabajos que permitan identificar mejores oportunidades de conocimiento respecto a las variables consideradas. Es importante señalar que los artículos identificados estuvieron relacionados principalmente con la degradación de contaminantes en aguas controladas o elaboradas en laboratorios, lo que destaca una oportunidad de investigación sobre la implementación y buen funcionamiento de degradación de los contaminantes de estos tratamientos en aguas residuales de efluentes en su estado natural, tanto provenientes de la industria como de plantas de tratamiento.

Además cabe destacar que actualmente se reporta el uso de procesos de fotocatalisis heterogénea con dióxido de titanio como el procedimiento que ha despertado mayor interés entre los investigadores, el cual emplea comúnmente electricidad como fuente de energía ecológica, además se reporta su rentabilidad, además de ser más amigable con el medio ambiente, si bien, se resalta la necesidad de desarrollar metodologías que presenten menor impacto al medio ambiente, por lo que hasta la fecha estos procesos destacan entre los que pueden ser viables a desde el punto de vista socio-ecológico (Davarnejad *et al.*, 2019), sin embargo, para el tratamiento de agua usando UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/O<sub>3</sub> se consideran como alternativas eficientes debido a su alto rendimiento. Es importante considerar algunas desventajas presentes en otros POAs como la post- separación requerida con el uso del semiconductor TiO<sub>2</sub> (Chon *et al.*, 2010), así como los ajustes de pH para los procesos Fenton y foto-Fenton (Ahmed *et al.*, 2011).

En relación a los porcentajes obtenidos de los artículos preseleccionados (PAA%), según Jurado (2017), si se superan el 50% en los resultados, el criterio alcanzará mayor atención en los próximos años, de acuerdo a esto, casi todos los criterios lo superan (C1= 100%, C2=65%, C3=40%, C4=100%) por lo que se espera que estos criterios tomen importancia en los siguientes años. En cambio, para el criterio 3,

estudios que realizan tratamientos con sólo uno de los procesos fotoquímicos (UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> y UV/O<sub>3</sub>) y/o de ósmosis inversa ha sido ampliamente empleada, y sobresale que la detección de sus deficiencias ha incentivado la atención hacia la implementación de otras técnicas avanzadas que actualmente se encuentran en estudios para evaluar la idoneidad de las mismas considerando las diferentes variables acotadas en los diferentes reportes científicos, esto señala un amplio campo de investigación de gran interés para generar aportaciones al desarrollo científico y tecnológico no solo en el tratamiento de aguas residuales con diferentes características, sino el impacto que generan tanto su implementación como su efecto en el medio ambiente.

## 9.2. (e) Análisis estadístico

La selección bibliográfica, a partir de los criterios especificados, arrojó un total de 100 artículos científicos, que son considerados los “individuos” de la base de datos que se elaboró. Como se explicó antes, a partir de la revisión sistemática, se realizó la selección de las variables más importantes que fueron: tipo de tratamiento, remoción de contaminantes, carga bacteriana y tipo de efluente tratado.

A continuación, se explican nuevamente, las categorías asignadas a cada una de esas variables y la denominación que se utiliza al desarrollar el ACM (Tabla 10).

*Tabla 10. Categorías asignadas y denominación en el Análisis de Correspondencias Múltiples*

<b>Tratamientos:</b>	<b>Categoría</b>	<b>Nueva denominación</b>
1	UV/H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	Col 1 / Fila 1
2	UV/HO <sub>3</sub>	Col 2 / Fila 2
3	UV/H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> /O <sub>3</sub>	Col 3 / Fila 3
4	Ósmosis inversa	Col 4 / Fila 4
<b>Carga bacteriana</b>		
1	considera que cause enfermedad	Col 5 / Fila 5
2	no considera que cause enfermedad	Col 6 / Fila 6
<b>Remoción de contaminantes</b>		

	1	considera contaminantes orgánicos	Col 7 / Fila 7
	2	considera contaminantes emergentes	Col 8 / Fila 8
<b>Efluentes</b>			
	1	considera ríos	Col 9 / Fila 9
	2	considera plantas de tratamiento de aguas	Col 10 / Fila 10
	3	considera otros efluentes	Col 11 / Fila 11
	4	aguas simuladas en lab	Col 12 / Fila 12

El ACM se inicia a partir de la llamada Tabla de Burt (Tabla 11) en la que se muestra a las variables como doce categorías con las frecuencias de cada una. Los más sobresalientes son la categoría 8, que corresponde a la consideración de la eliminación de contaminantes emergentes con 72 artículos reportados, de igual forma la categoría 6, que pertenece a artículos que no toman en cuenta la eliminación de bacterias que podrían causar enfermedades con 57 artículos, por último, la categoría 1 referente al tipo de tratamiento con peróxido de hidrógeno con 46 artículos.

Tabla 11. Análisis de Burt

	Col 1	Col 2	Col 3	Col 4	Col 5	Col 6	Col 7	Col 8	Col 9	Col 10	Col 11	Col 12
	Trat	Trat	Trat	Trat	Car Bac	Car Bac	Rem Cont	Rem Cont	Eflu	Eflu	Eflu	Eflu
<b>Fila 1</b>	46	0	0	0	18	28	12	34	5	13	14	14
<b>Fila 2</b>	0	9	0	0	3	6	4	5	0	3	2	4
<b>Fila 3</b>	0	0	35	0	16	19	10	25	2	9	14	10
<b>Fila 4</b>	0	0	0	10	6	4	2	8	2	3	5	0
<b>Fila 5</b>	18	3	16	6	43	0	10	33	6	12	16	9
<b>Fila 6</b>	28	6	19	4	0	57	18	39	3	16	19	19
<b>Fila 7</b>	12	4	10	2	10	18	28	0	3	8	11	6
<b>Fila 8</b>	34	5	25	8	33	39	0	72	6	20	24	22
<b>Fila 9</b>	5	0	2	2	6	3	3	6	9	0	0	0
<b>Fila 10</b>	13	3	9	3	12	16	8	20	0	28	0	0

<b>Fila 11</b>	14	2	14	5	16	19	11	24	0	0	35	0
<b>Fila 12</b>	14	4	10	0	9	19	6	22	0	0	0	28

A partir de la tabla de Burt se desarrolla el proceso de reducción de dimensión. El análisis, de igual manera al ACP, presenta un análisis de los ejes, dimensiones o componentes, donde la inercia representa la variabilidad del fenómeno y la proporción de las componentes que más se explican (Figura 9). Por lo que tomando en cuenta lo anterior, las dos primeras componentes explican el 32% de la variabilidad total del fenómeno bajo estudio.

```

Analysis of Indicator Matrix

Axis  Inertia  Proportion  Cumulative  Histogram
  1    0.3482    0.1741     0.1741     *****
  2    0.2832    0.1416     0.3157     *****
  3    0.2734    0.1367     0.4524     *****
  4    0.2524    0.1262     0.5786     *****
  5    0.2425    0.1212     0.6999     *****
  6    0.2333    0.1166     0.8165     *****
  7    0.2044    0.1022     0.9187     *****
  8    0.1625    0.0813     1.0000     *****
Total 2.0000

```

*Figura 9. Análisis de los componentes*

Al analizar la tabla de las contribuciones (Tabla 12), las variables que se destacan son: en la primera componente, las variables 4, 5, 9 y 12 que corresponden al tipo de tratamiento de ósmosis inversa, la carga bacteriana, la consideración de ríos y de aguas simuladas respectivamente. En el caso de la segunda componente, las variables que destacan son la 1, 7, 11 y 12, que corresponden al tipo de tratamiento de UV con peróxido, contaminantes orgánicos, otros efluentes y ríos respectivamente.

Tabla 12. Componentes principales

Column Contributions										
ID	Name	Qual	Mass	Inert	Component 1			Component 2		
					Coord	Corr	Contr	Coord	Corr	Contr
1	Column1	0.362	0.115	0.068	0.131	0.015	0.006	-0.638	0.347	0.165
2	Column2	0.266	0.022	0.114	1.319	0.172	0.112	0.974	0.094	0.075
3	Column3	0.114	0.087	0.081	0.012	0.000	0.000	0.460	0.114	0.065
4	Column4	0.396	0.025	0.112	-1.835	0.374	0.242	0.447	0.022	0.018
5	Column5	0.367	0.108	0.071	-0.691	0.361	0.148	-0.092	0.006	0.003
6	Column6	0.367	0.142	0.054	0.522	0.361	0.111	0.069	0.006	0.002
7	Column7	0.419	0.070	0.090	0.262	0.027	0.014	1.004	0.392	0.249
8	Column8	0.419	0.180	0.035	-0.102	0.027	0.005	-0.391	0.392	0.097
9	Column9	0.307	0.022	0.114	-1.526	0.230	0.151	-0.878	0.076	0.061
10	Column10	0.004	0.070	0.090	0.034	0.000	0.000	0.092	0.003	0.002
11	Column11	0.336	0.087	0.081	-0.381	0.078	0.036	0.692	0.258	0.148
12	Column12	0.516	0.070	0.090	0.932	0.338	0.175	-0.675	0.177	0.113

En la figura 10 se representa el gráfico de correspondencia múltiple, se observa que para el componente 1 las variables más importantes y que se relacionan más son la 2, 4, 9 y 12 que son los tipos de tratamiento con UV y ozono, de ósmosis inversa, la consideración de ríos y de aguas simuladas respectivamente. Dentro del componente 2, las variables más importantes son la 2, 7, 9 y 12, es decir, tratamiento de UV con ozono, contaminantes orgánicos, consideración de ríos y de aguas simuladas en laboratorio, respectivamente.

La reiteración de las variables 2,12 y 9 como importantes, en las dos primeras componentes, nos hace suponer la importancia que se brinda a estas variables en las revistas estudiadas.

Lo que podría deberse a que esta técnica de descontaminación (UV/ozono) tiene un porcentaje de degradación de los contaminantes del 90%, aunque es menos reportada en su uso en comparación con los demás tratamientos que son efectivos en algunos tipos de contaminantes emergentes y orgánicos pero su grado de degradación es menor o necesitan de otros tratamientos adjuntos para su mejor funcionamiento. Y en donde los expertos como investigadores universitarios, ingenieros de la industria e investigadores con amplia experiencia en los tratamientos avanzados de oxidación, toman como determinante los costos de energía y operativos para la selección e implementación de tecnologías (Rueda *et al.*, 2020).

Además, se debe tomar en cuenta que la degradación de los contaminantes mediante la utilización de ozono, se puede agrupar en categorías, siendo así la degradación directa o indirecta donde los radicales hidroxilos cumplen una función importante, asimismo, el ozono tiene una capacidad de oxidación limitada y su eficiencia de degradación es menor (Feng *et al.*, 2021).

Autores reportan que dentro de los factores clave dentro de los procesos UV/O<sub>3</sub> son el modo de distribución eficiente del O<sub>3</sub>, el control de la presión dentro del reactor y la relación entre la cantidad de ozono y la intensidad de la radiación UV aplicada, todo esto podría afectar la operación (Yang *et al.*, 2020; Rekhate, *et al.*, 2020); así como el tiempo de contacto y la susceptibilidad de los contaminantes a degradar, además este proceso detiene la formación de subproductos halogenados, sin embargo, la inestabilidad del ozono y una vida baja limitara la eficiencia de degradación de los contaminantes (Kurt *et al.*, 2017).

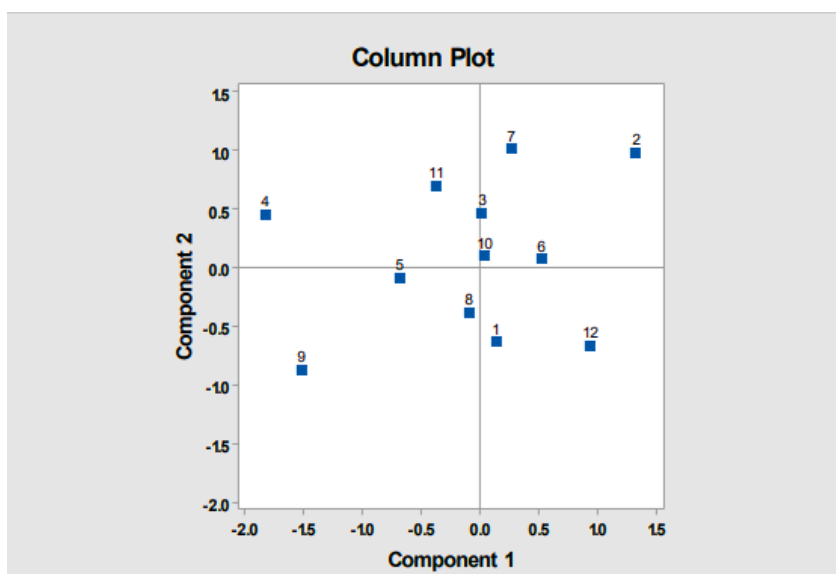
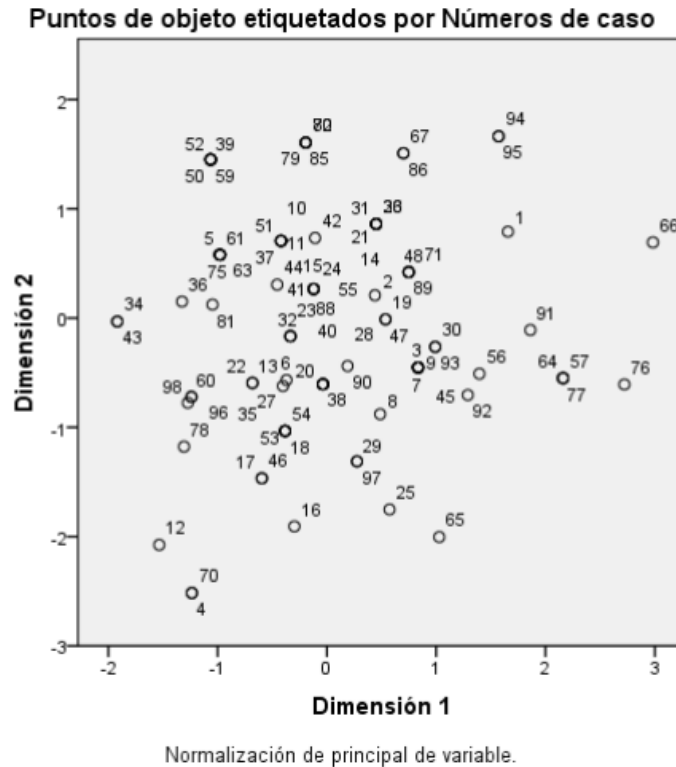


Figura 10. Gráfico de las dos primeras componentes

La figura 11 es la representación gráfica de los cien artículos estudiados y se resaltan a los artículos más importantes en cada dimensión, siendo así los documentos número 50, 52, 39,59, 61, 63, 64, 77 y 97, los cuales reportan en su

mayoría el uso de los procesos fotoquímicos con peróxido y ozono (UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/O<sub>3</sub>), solamente se destacan dos artículos en la utilización de la ósmosis inversa y de UV con ozono. Así mismo, estos artículos tratan sobre aguas simuladas en laboratorio y tratando contaminantes emergentes como metanfetaminas, microcistinas, sulfatos entre otros. Además, estas investigaciones son realizadas mayormente en países como China, Bélgica, Turquía, Malasia y de acuerdo a Rizzo *et al.*, (2019), se tiene el reporte que la tecnología más recomendada es el ozono, seguido de peróxido y finalmente el uso de las tecnologías Fenton, por lo que se podría estar justificando que los investigadores hagan uso de las tecnologías en conjunto como peróxido y ozono (UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/O<sub>3</sub>) para el tratamiento de las aguas residuales.

Igualmente, en la realización de estudios en donde se realiza un solo proceso de UV/O<sub>3</sub>, se obtuvieron eficiencias de degradación bajas y después de utilizar conjuntamente con peróxido de hidrógeno, la eficiencia mejoro significativamente (Feng *et al.*, 2021); en donde las diferentes cantidades agregadas de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> influirán en los procesos UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/O<sub>3</sub>, siendo estudios en donde se logra una máxima eficiencia con dosis de 6-8 ml de peróxido durante una reacción de tres horas (Feng *et al.*, 2021; Solmaz *et al.*, 2012).



*Figura 11. Puntos objeto por número de caso*

Finalmente, el diagrama de dispersión biespacial (Fig. 12) muestra el número del artículo científico que usa más algún tipo de categoría. Es decir, el artículo número 16, 12, 48 y 13 hablan sobre la remoción de los contaminantes, pero al mismo tiempo se alejan de la categoría de carga bacteriana. Se puede describir, que en la dimensión 1 destacan las categorías del Tipo de Efluente, Tipo de tratamiento y la Remoción de los contaminantes, y la carga bacteriana es la que destaca o tiene mayor peso en la dimensión 2 como se ha descrito anteriormente.

La mayor parte de los artículos reportan la degradación de un tipo de contaminante en específico, muchas veces creado en laboratorios o extraído de un tipo de agua residual en especial y de acuerdo al estudio de la carga bacteriana se centran en el estudio de bacterias que podrían causar daño en la salud de las personas como *E. coli*, coliformes totales, *Salmonella spp.* entre otras, que entran en contacto con aguas residuales altamente contaminadas con bacterias de este tipo, por lo que los



### **9.3. Opinión de expertos en descontaminación de agua residual**

El problema de la contaminación del río Atoyac y de la presa de Valsequillo, no solo impacta a las áreas aledañas agrícolas y de pastoreo, sino que también afecta a la producción pesquera de la zona, al turismo de la región y a los ecosistemas presentes en esta región, también se toma en cuenta el daño a la salud de la población aledaña que convive con las aguas contaminadas de la presa afectando también la situación económica de la zona relacionados con la disposición de las aguas fluviales, por otro lado, ocasiona la extensión de la zona industrial al optar por verter sus aguas residuales sin tratamientos en el río.

De acuerdo a las opiniones vertidas por los expertos, coinciden en que el principal problema con el agua residual de Puebla es el de la presa de Valsequillo y a la falta de políticas públicas (E. Mangas, comunicación personal, 06 de abril del 2021) con respecto a las normativas de descarga de aguas residuales a los ríos que alimentan la presa y a la poca información de las comunidades aledañas a la misma que de igual manera vierten sus desechos a la presa.

Además de que el gobierno estatal tiene argumentos negativos en relación a un tratamiento de las aguas residuales por parte de las industrias ya que las respuestas más comunes son que los ríos ya vienen contaminados por los estados vecinos (Gunther Geissler, comunicación personal, 02 de abril del 2021).

Diferentes reportes científicos coinciden en que existe una participación baja o limitada por parte de las dependencias de gobierno del estado, ya sea a causa de los bajos presupuestos destinados a programas de gestión de cuencas de CONAGUA y una escasa participación y/o atención al correcto funcionamiento de las plantas de tratamiento, que como consecuencia no pueden satisfacer las necesidades para las que han sido creadas, mucho menos las de los municipios (Casiano et al., 2016).

En relación al posible tratamiento del efluente de Valsequillo, ambos expertos mencionan que sería difícil realizarlo con instrumentación pequeña, a lo cual refieren que el proceso debería ser apto para el tratamiento de grandes cantidades de agua,

lo que podría resultar costoso, pero en beneficio a un largo plazo. Por su parte el Dr. Ernesto Mangas menciona que los procesos de inyección de ozono por medio de barcos que actualmente se están implementando son de ayuda para la oxigenación y la posible eliminación de diferentes elementos como metales pesados y coliformes fecales, sin embargo, se tienen muy pocos estudios de la eficiencia de estos tratamientos.

Por otro lado, el Dr. Gunther menciona que para un tratamiento eficiente sería necesario una cadena de varios métodos diferentes de descontaminación y al final de esta cadena, sería conveniente implementar los procesos fotoquímicos en dos etapas, en la primera, es necesario oxidar los componentes orgánicos de los complejos solubles que contienen metales pesados, liberando átomos de los metales y poder precipitarlos; en la segunda etapa sería una desinfección de la materia orgánica mediante luz UV.

Acorde a lo anterior, sería posible una utilización del agua tratada de la presa tanto en la agricultura como las industrias aledañas que la requieran, además de que el ecosistema de la zona se vería beneficiado con la purificación del agua residual. A continuación, se presenta la relación de la revisión sistemática y la opinión de los expertos (Tabla 13).

TABLA 13. Se presentan las opiniones emitidas por los expertos consultados, con sus coincidencias, relaciones con la revisión sistemática y recomendaciones.

Opiniones emitidas por los expertos consultados		Coinciden	Relación con los resultados de la rev sistemática	Recomendación
Dr Ernesto Mangas	Dr Gunther Geissler			
<b>Aspecto general de la contaminación de la presa de Valsequillo</b>				
El mayor desafío es la voluntad política, las acciones que se han ejercido parciales y pequeñas y pareciera que realmente no les interesa resolver este problema que tiene una cuestión de salud grande, la inversión es pequeña o para generar un atractivo visual como el ecoparque pero que no trabajan directamente sobre el río.	El problema fundamental de la presa es que las aguas de las efluencias están contaminadas con una mezcla de contaminantes múltiples y de concentraciones variables, porque estas aguas tienen su origen tanto de varias industrias como también de las actividades privadas de la gente en los pueblos cerca de las orillas de la presa y de los afluentes. También la mala costumbre de mucha gente de tirar basura al agua y en los terrenos, de donde en tiempo de lluvias esta basura esta transportada a los ríos que entran a la presa.	SI	Sin relación con los resultados de la revisión sistemática	No hay recomendación
<b>Aspecto referente a su experiencia en los tratamientos utilizados</b>				
Dos casos: Valsequillo como tal debido a la presencia de lirio acuático que eliminan un porcentaje alto de contaminantes que viene del Atoyac es un tipo de agua distinta que llega del Atoyac, creo que las técnicas de descontaminación de salida del	Ya desde hace muchos años hablamos con las autoridades del estado de Puebla para que ellas exigen que cada industria haga un tratamiento de sus aguas residuales y en las respuestas un argumento negativo fue varios ríos llegan ya contaminados de estados vecinos. Obviamente no es posible hablar y lograr un convenio con ellos.	NO	Opinión 1: Si – Tratamientos con ozono Opinión 2: No- Utilización de más procesos que no son los que	No hay recomendación

<p>Atoyac debe ser la oxidación avanzada la inyección de ozono y oxígeno que permite una mayor oxigenación que elimina coliformes fecales de golpe y muchos compuestos que tienen anillos bencénicos, alquinos, cianuros, cianotoxinas que tienen dobles y triples enlaces que son rápidamente degradados y convertidos en partículas más fáciles de descomponer gracias a la acción del ozono.</p>	<p>La presa de Valsequillo contiene una cantidad enorme de agua contaminada con una multitud de sustancias muy variadas y por lo tanto para purificar esta agua ya acumulada en la presa no veo un solo método con equipos pequeños y baratos, los cuales no tengan tamaño industrial. Al principio faltaría hacer muchos análisis en diferentes lugares de la presa, en las afluencias y a tiempos y días diferentes.</p>		<p>menciona la revisión sistemática</p>	
<p><b>Aspecto referente a los tratamientos</b></p>				
<p>Para la utilización de estos tratamientos en un río que tienen transparencias de unos pocos cm sería conveniente, pero en el caso del Atoyac y Valsequillo de una profundidad mayor la parte de abajo no será tratada, el diseño debe de avanzar a una propuesta aplicable.</p>	<p>Es claro que un solo método de tratamiento del agua que ya está en la presa no va a lograr un agua muy limpia, sino sería necesaria a tamaño industrial una cadena de varios métodos diferentes. Casi al final de esta cadena, el proceso fotoquímico/foto-oxidativo puede lograr dos efectos en dos etapas:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- En la primera etapa hay que oxidar los ligantes químicos orgánicos de los complejos solubles que contienen metales pesados y así liberar estos átomos de los metales y poder precipitarlos.</li> <li>- En la segunda etapa hay que desinfectar el agua con luz UV.</li> </ul> <p>Como este proceso de purificación en varias etapas sería muy complejo resulta</p>	<p>SI</p>	<p>SI-ambas opiniones coinciden con la información obtenida en la revisión sistemática</p>	<p>Trabajos experimentales constantes</p>

	hacer antes también un trabajo intenso experimental.			
<b>Aspecto referente a la viabilidad del uso del agua a la zona aledaña a la Presa de Valsequillo</b>				
Es más fácil limpiar el efluente es decir lo que sale de Valsequillo que lo que entra, dado que existen 24 plantas de tratamiento de las cuales y depende del año a veces no funcionan 18 o 19, solamente se limpia el 10% del río, habrá que trabajar con la regulación de la ley de aguas nacionales. El efluente puede ser tratado en algunos de los canales de riego que es la agua que llegará directamente a las áreas de cultivo y con la que la gente estará en contacto, las cuales deben de ir libres de patógenos.	Para el uso del agua tratada en la agricultura y para la población el agua ya no debe contener sustancias venenosas, metales pesados, microbios peligrosos, etc	SI	SI	Importante trabajar en esta zona con plantas de tratamiento terciario.

NOTA: La percepción de cada opinión esta expresada textualmente según cada experto.

## **X. Perspectiva en las ciencias ambientales**

La utilización de los tratamientos fotoquímicos (UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, UV/O<sub>3</sub>, UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/O<sub>3</sub>) como tecnologías sostenibles para el tratamiento de las aguas residuales se debe comprender como un sistema complejo (fig. 3) en el que se involucran un conjunto de procesos, así como la interacción de fenómenos y elementos.

El adecuado funcionamiento de los tratamientos utilizados directamente en el efluente se verá afectado tanto por la cantidad de agua residual que entra en los sistemas como en la cantidad de agua tratada que salga del mismo, en donde no solamente se toma en cuenta un tipo de agua residual con determinados contaminantes, si no, una compleja red de contaminantes provenientes de aguas industriales y domesticas que experimentan cambios a lo largo del tiempo y de las estacionalidades.

El tratamiento de las aguas residuales mediante estos tratamientos y la obtención de agua útil y de calidad, comprende aspectos e interacciones complejas que van desde la perspectiva económica, social y ambiental, en donde se incluye no solamente a las industrias que realizan las descargas de aguas residuales, además la presencia de zonas urbanas y rurales que completan un sistema complejo, así como la consideración de los contaminantes presentes, agentes patógenos y el ecosistema.

Lo que genera una serie de limitaciones que no puede ser previstas al momento de la operación de estos sistemas, es decir se producen externalidades en donde no se toman en cuenta los posibles costos adyacentes al utilizar los diversos procesos de desinfección del agua, y si estos procesos son eficientes con la gran cantidad de compuestos contaminantes presentes en el agua, además de los costos aunados a las pruebas bacteriológicas para la confirmación de la remoción de carga bacteriana y otros procesos. Además de la generación de lodos que pueden ser una fuente de contaminación ambiental. Se debe tener en cuenta una serie de cuestiones sociales en la que el agua residual es ocupada como fuente de riego por numerosos

agricultores de la zona y personas que la habitan, los cuales se verían afectados, dado que utilizan estas aguas por el aporte nutritivo a los cultivos, pero sin tomar en cuenta el daño a la salud que estas aguas generan. Y podría genera disputas por la aplicación de un tratamiento a las aguas residuales.

En este caso se han realizado investigaciones sobre los obstáculos de la aceptación social de la reutilización de las aguas residuales tratadas para riego y como bebedero para ganado (Lahlou *et al.*, 2021), sin embargo, en diferentes países como lo son en China y en Reino Unido proporcionan reportes sobre la aprobación de la utilización de las aguas residuales tratadas (Baawain *et al.*, 2018), en lo que influyen algunos factores divididos en tres categorías como lo propone Fielding *et al.*, 2018: en primer lugar factores sociodemográficos en los que se incluyen el nivel de educación, edad, condición económica entre otros, seguido de factores psicológicos en razón de la percepción del riesgo representado para la salud y por último las características del agua que se trata.

Invertir eficientemente en aguas residuales e infraestructuras de saneamiento es crucial para lograr beneficios de salud pública, mejorar el medio ambiente y la calidad de vida. Ya que son una parte esencial para prevenir enfermedades infecciosas, incluyendo la actual pandemia (COVID-19) que se está viviendo. Las plantas de tratamiento deben considerarse como plantas de recuperación de recursos y al mismo tiempo apoyar modelos de negocios innovadores y sostenibles que consideren las limitaciones, posibilidades y se adapten a cada región, en donde se incorporen diversas metodologías para la creación de sistemas complejos entre el ámbito social, económico, ambiental y político entre otros y que generen análisis y acciones a la problemática socioambiental y de bienestar social.

## **XI. CONCLUSIONES**

El análisis realizado con los criterios considerados en este trabajo demostró que los mejores tratamientos para la remoción de los contaminantes orgánicos y de la carga bacteriana en aguas residuales son los que usan tratamientos de UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/O<sub>3</sub> y del uso de la ósmosis inversa.

La revisión sistemática realizada evidenció que el tratamiento de luz UV con peróxido (UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) es uno de los más empleados para la descontaminación de aguas que contienen contaminantes orgánicos, así como para aguas con presencia de contaminantes emergentes y bacterias dañinas para la salud, en países en desarrollo que buscan tecnologías económicamente viables.

El análisis estadístico de la información recopilada permitió identificar los aspectos más importantes en los diferentes reportes de investigación, como son el tipo de tratamiento a utilizar en los diferentes contaminantes y así como el tipo de agua y/o efluente que se utiliza para los estudios reportados, destaca que los trabajos científicos se enfocan predominantemente en el estudio con aguas simuladas en laboratorio, lo cual pone de manifiesto la necesidad de realizar nuevos estudios de estos tratamientos en aguas residuales de efluentes y evaluar su capacidad de degradación, en estos sistemas complejos.

De acuerdo con la opinión de los expertos, el agua residual de la ciudad de Puebla es necesario que además de la necesidad de la aplicación de tratamientos primarios y secundarios, es de gran importancia la implementación de procesos fotoquímicos, que a la fecha demuestran gran eficiencia, considerando estrictas metodologías que permitan evaluar su eficiencia. Además, se debe tomar en cuenta que los sistemas de tratamiento deben ser económicamente viables y eficientes socio-económicamente, así como permitan la sostenibilidad ambiental, y continuar trabajando en esta importante área de la ciencia para lograr en el futuro poder reutilizar el agua tratada con mayor confiabilidad y por una mayor parte de la población, lo que requiere que la operación de las plantas tratadoras sea factible en términos de personal altamente capacitado para su funcionamiento.

La aportación de realizar la presente revisión sistemática permitió evaluar la calidad y metodologías empleadas en las investigaciones realizadas en el área de las ciencias ambientales vinculada al tratamiento de aguas residuales, además de sintetizar la evidencia científica y de servir de utilidad para la toma de decisiones en futuras investigaciones.

Una valoración económica de los impactos ambientales como parte clave de un análisis costo-beneficio con objetivos de mejoras socio-ambientales de los proyectos de tratamientos de las aguas residuales son de gran relevancia, sin embargo, estos no han sido objeto de cuantificación en este estudio por lo que se recomienda su implementación en proyectos futuros.

## XII. REFERENCIAS:

1. Aguilera E. R. (2014). ¿Revisión sistemática, revisión narrativa o metaanálisis? *Revista de la Sociedad Española del Dolor*. **21**(6), 359-360.
2. Ahmed K., Peng B. y Huang K. (2011). Hydro-thermal preparation of nanostructured manganese oxides (MnOx) and their electrochemical and photocatalytic properties. *Chem. Eng. J.* **172** 531-539.
3. Al Aukidy M., Al Chalabi S., Verlicchi P. (2017) Hospital Wastewater Treatments Adopted in Asia, Africa, and Australia. In: Verlicchi P. (eds) Hospital Wastewaters. The Handbook of Environmental Chemistry, vol 60. Springer, Cham.
4. Anda Sánchez, José de. (2017). Saneamiento descentralizado y reutilización sustentable de las aguas residuales municipales en México. *Sociedad y ambiente*, **(14)**, 119-143.
5. Aracil J.F., Valcárcel Y., Negreira N., Alda M.L., Barceló D., Cardona S.C. y Laboulais J.N. (2016) Ozonation of hospital raw wastewaters for cytostatic compounds removal: kinetic modelling and economic assessment of the process. *Sci. Total Environ.* **556**, 70–79.
6. Arslan A.; Topkaya E.; Bingöl D. y Veli S. (2018) Removal of anionic surfactant sodium dodecyl sulfate from aqueous solutions by O<sub>3</sub>/UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> advanced oxidation process: Process optimization with response surface methodology approach. *Sustainable Environment Research*. **28** (2) 65-71.
7. Baawain M. S., Al-Mamun A., Omidvarborna H., Al-Sabti A. y Choudri B.S. (2018). Public perceptions of reusing treated wastewater for urban and industrial applications: challenges and opportunities. *Environ. Dev. Sustain.* **22**, 1859–1871.
8. Barbosa M.O., Moreira N.F.F., Ribeiro A.R., Pereira M.F.R. y Silva A.M.T. (2016) Occurrence and removal of organic micropollutants: An overview of the watch list of EU Decision. *Water Research* **94**, 257-279
9. Bhandari M., Devereaux P., Montori V., Cinà C., Tandan V y Guyatt G.H., for the Evidence-Based Surgery Working Group. (2004) Users' guide to the

- surgical literature: how to use a systematic literature review and meta-analysis. *Can J Surg.* **47**, 60-67.
10. Binnie, C., Kimber M. y Smethurst G. (2009). *Basic Water Treatment 4th Edition*. Thomas Telford Publishing. ISBN 10: 0727736086
  11. Blanco J. S., Malato C., Estrada J., Peral B., y Cardona I. (2001) Purificación de aguas por fotocátalisis heterogénea: estado del arte. En *cyted eliminación de contaminantes por fotocátalisis heterogénea* ed. Miguel a. Blesa, la plata-argentina, 51 - 76.
  12. Blesa, M.A (2001). *Eliminación de contaminantes por fotocátalisis heterogénea*. La plata argentina, *CYTED*. ISBN: 987-43-3809-1.
  13. Boehm Schoendube, Brigitte. (2005). Agua, tecnología y sociedad en la cuenca Lerma-Chapala: Una historia regional global. *Nueva antropología*, **19**(64), 99-130.
  14. Boletín del Foro Mundial del Agua (2006) Un Reporte Diario del IV Foro Mundial del Agua. Publicado por el Instituto Internacional para el Desarrollo Sostenible (IIDS) en colaboración con el Secretariado del IV Foro Mundial del Agua. **82** (9).
  15. Calderón G. C., Mosquera M. I., Balagué G. L., Retolaza B. A., Bacigalupe de la Hera A., Belaunzaran M. J., Iruin S. A. y García M. B. (2014). Modelos de colaboración entre atención primaria y salud mental en la asistencia sanitaria a las personas con depresión: resultados principales y retos metodológicos de una meta-revisión sistemática. *Revista Española de Salud Pública.* **88**(1), 113-133.
  16. Carter K. A. y Beaulieu L. J. (1992). *Conducting A Community Needs Assessment: Primary Data Collection Techniques*. Gainesville, FL: University of Florida—Institute of Food and Agricultural Sciences.
  17. Casas Jiménez J.J. (2017) *Guía para la realización de un estudio ambiental: El caso de la cuenca del rio Adra*. Vol. 11 de Textos Docentes, Universidad Almería.
  18. Casiano C., Bressers H. y Gleason A. (2017) *Evaluación de la gobernanza de la política de las plantas de tratamiento residual (2013-2016)*, en la zona

centro de México: los casos de Tlaxcala-Zahuapan, Puebla-Atoyac y Presa Guadalupe en el Estado de México. Trabajo presentado en el 1er Foro Internacional "Políticas públicas para el desarrollo sustentable, Puebla, México.

19. Casiano Flores C., Gleason J., Vikolainen V. y Bressers H. (2016). Evaluación de la gobernanza: análisis de la política de tratamiento de aguas residuales en el alto balsas Puebla y Tlaxcala. Conferencia: Memoria del IV Congreso Nacional de Manejo de Cuencas Hidrográficas. Xalapa.
20. Centro Cochrane Iberoamericano. (2012). Manual cochrane de revisiones sistemáticas de intervenciones, versión 5.1.0 [actualizada en marzo de 2011]. Disponible en: <http://www.cochrane.es/?q=es/node/269%0A4>
21. Chen Y., Hu W., Huang B., Weindorf C., Rajan N., Liu X. y Neidermann S. (2013). Accumulation and health risk of heavy metals in vegetables from harmless and organic vegetable production systems of China. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. **98**, 324-330.
22. Chiva V., Berlanga C., Martínez C. y Climent J. (2017) Procesos de oxidación avanzada en el ciclo integral del agua. Publicacions de la Universitat Jaume I, D.L. ISBN: 978-84-16546-30-5.
23. Chong M., Jin C. y Saint S. (2010). Recent developments in photocatalytic water treatment technology: a review. *Water Res.* **44** 2997-3027.
24. CNDH (Comisión Nacional de los Derechos Humanos) (2017). Recomendación a los tres órdenes de gobierno por ser omisos antes la contaminación por aguas residuales de los ríos Atoyac, Xochiac y sus afluentes que viola derechos humanos de los habitantes de las comunidades aledañas. Comunicado de prensa No. 83.
25. Codina L. (2017) Investigación con bases de datos. Estructura y funciones de las bases de datos académicas. Análisis de componentes y estudio de caso. Universidad Universitat Pompeu Fabra, Barcelona.
26. CONAGUA (2015): Estadísticas del Agua en México. Comisión nacional del agua (CONAGUA), México, D.F

27. CONAGUA (2018). Indicadores Económicos del agua en México. Disponible en:  
<http://sina.conagua.gob.mx/sina/tema.php?tema=indicadoresEconomicos>
28. CONAGUA (2021). Calidad del agua en México. Disponible en: <https://www.gob.mx/conagua/articulos/calidad-del-agua>
29. Cooper H. (2010). Research synthesis and meta-analysis: A step-by-step approach (3<sup>a</sup> ed.). Thousand Oaks, CA: Sage.
30. Coz A. y Villaseñor J. (2003). Tratamiento de efluentes fenólicos de la industria de la celulosa: procesos de oxidación avanzada. *Ingeniería Química*. Madrid. **358**, 104-114.
31. Crini G., Lichtfouse E. (2018) Wastewater Treatment: An Overview. In: Crini G., Lichtfouse E. (eds) Green Adsorbents for Pollutant Removal. Environmental Chemistry for a Sustainable World, vol 18. Springer, Cham.
32. Crites R., Middlebrooks E. y Reed S. (2006). Natural Wastewater Treatment Systems. *CRC Press*, Taylor y Francis Group.
33. Cuerda Correa E.M., Alexandre Franco M.F. y Fernández González, C. (2020). Advanced oxidation processes for the removal of antibiotics from water. An overview., *Water*, **12**(1), 102.
34. Davarnejad R., Sarvmeili K. y Sabzehei M. (2019). Tratamiento de aguas residuales de lavado de autos mediante un proceso de oxidación avanzado: una técnica rápida para la reducción de DQO de las fuentes de contaminantes del agua. *Revista de la Sociedad Química Mexicana*, **63** (4), 164-175.
35. De la Peña, María Eugenia; Ducci, Jorge, y Zamora, Viridiana (2013). Tratamiento de aguas residuales en México. Banco Interamericano de Desarrollo-Sector de Infraestructura y Medio Ambiente. Nota Técnica # IDB-TN-521, 42
36. Dewil, R., D. Mantzavinos, I. Poulios y M. A. Rodrigo (2017). New perspectives for Advanced Oxidation Processes. *Journal of Environmental Management*. **195**, 93-99.

37. Diario Oficial de la Federación (DOF). (1996). Límites Máximos Permisibles de Contaminantes en Las Descargas de Aguas Residuales en Aguas y Bienes Nacionales; NOM-001-SEMARNAT-1996. Ciudad de México, México. Disponible en: <http://www.profepa.gob.mx/innovaportal/file/3290/1/nom-001-semarnat-1996.pdf> (Consultado 20 de enero 2021).
38. Diario Oficial de la Federación (DOF). (1996). Límites Máximos Permisibles de Contaminantes en Las Descargas de Aguas Residuales en Aguas y Bienes Nacionales NOM-002-SEMARNAT-1996. Ciudad de México, México. Disponible en: [http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Publicaciones/Publicaciones/S\\_GAA-15-13.pdf](http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Publicaciones/Publicaciones/S_GAA-15-13.pdf) (Consultado 20 de enero 2021).
39. Diario Oficial de la Federación (DOF). (1997) Límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reúsen en servicio público. NOM-003-ECOL-1997. Disponible en: <http://www.ordenjuridico.gob.mx/Documentos/Federal/wo69207.pdf> (Consultado 20 de enero 2021).
40. Díaz L, Torruco U, Martínez M, Varela M. (2013). La entrevista, recurso flexible y dinámico. *Inv Ed Med*. **2**(7):162-7.
41. El-Shahawi, M. S., Hamza, A., Bashammakh, A. S. y Al-Saggaf, W. T. (2010) An overview of the accumulation, distribution, transformations, toxicity and analytical methods for the monitoring of persistent organic pollutants. *Talanta*, **80**, 1587-1597.
42. Escobedo M., Salas J. y Muñoz G. (2006). Evaluación de los procesos de purificación de una despachadora de agua potable en Ciudad Juárez. *Revista Cultura Científica y Tecnológica*. Año 3, **13**. ISSN 2007-0411.
43. Fariñas Iglesias M. (1999). Ósmosis Inversa. Fundamentos, tecnología y aplicaciones. *Editores Mc Graw Hill*.
44. Fernández I., De las Nieves L. y Rodríguez M. (2004). "Propiedades coloidales de partículas de TiO<sub>2</sub>: Aplicación al tratamiento fotocatalítico Solar de aguas". *CIEMAT*.

45. Fielding K.S., Dolnicar S. y Schultz T. (2018). Public acceptance of recycled water Int. J. *Water Resour. Dev.* 1-36,
46. Flick U (2004) Introducción a la investigación cualitativa. Madrid: Morata.
47. Forero J. E., Ortiz O. P. y Rios F. (2005). Aplicación de procesos de oxidación avanzada como tratamiento de fenol en aguas residuales industriales de refinería. *CT&F - Ciencia, Tecnología y Futuro.* **3**(1), 97-109
48. Frank R. (2014). *Water and Wastewater Treatment Plant Operations* by Taylor & Francis Group, LLC CRC Press is an imprint of Taylor & Francis Group, an Informa business. ISBNr-13: 978-1-4665-5338-5.
49. García A. y Elías L. (2013). Características y utilidad de las Revisiones Sistemáticas o Meta-análisis. *Revista Científica Ciencia Médica.* **16**(2), 4-5.
50. García J., Plazas C., Muñoz F., y Polo A. (2000). Evaluation of heavy metals pollution on barley crop by agricultural use of municipal solid waste compost. Centro de Ciencias Medioambientales, CSIC. Madrid. *3<sup>rd</sup> International Symposium on Geotechnics related to the European Environment.* Berlin, Alemania.
51. Gil M. J., Soto A. M., Usma J.I y Gutiérrez O.D. (2012). Contaminantes emergentes en aguas, efectos y posibles tratamientos. *Producción + limpia.* **7**(2) 52-73.
52. Gfri R.; Ozaki H.; Takayanagi Y.; Taniguchi S. y Takanami R. (2011) Efficacy of ultraviolet radiation and hydrogen peroxide oxidation to eliminate large number of pharmaceutical compounds in mixed solution. *International Journal of Environmental Science & Technology.* **8** (1) 19-30.
53. Gómez C. A. R., Saavedra A. J., y Ramos C. A. (2014) "DCDC converters in wind systems for micro-generation: a systematic review," *Revista de Ingeniería.* **40.** 14–19.
54. González F. I., Urrutia G y Alonso C. P. (2011). Revisiones sistemáticas y metaanálisis: bases conceptuales e interpretación. *Rev. Esp Cardiol.* **64** (8), 688-696.

55. González García N. y Taborda Londoño A. (2015) Análisis de componentes principales SPARSE, Formulación, algoritmos e implicaciones en el análisis de datos. Tesis de Maestría. Universidad de Salamanca. España.
56. González Silvia y Huddart David (2008). The Late Pleistocene Human Occupation of Mexico. Memoria de Simposio Internacional de FUMDHAM, 2008. Rio de Janeiro, Brasil.
57. Grijalva E. A., Jiménez H. M., y Ponce S. H. (2020). Desmineralización del agua como respuesta ante el cambio climático. *RECIMUNDO*. **4**(4), 22-36.
58. Haddad T., Baginska E. y Kümmerer K. (2015) Transformation products of antibiotic and cytostatic drugs in the aquatic cycle that result from effluent treatment and abiotic/biotic reactions in the environment: An increasing challenge calling for higher emphasis on measures at the beginning of the pipe. *Water Research* **72**, 75-126
59. Hassanshahi N. y Karimi Jashni A. (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 Ecotox. *Environ. Safe.*, **161**, 683-690.
60. Heinemann K. Introducción a la metodología de la investigación empírica en las ciencias del deporte. Barcelona: Paidotribo; 2003.
61. Hernández S. F., Del Saz S. y Sala R. (2007) Eficiencia técnica y estacionalidad en los procesos de tratamiento de aguas residuales. XVI Jornadas ASEPUMA – IV Encuentro Internacional. Vol 16 Issue 1: 703.
62. Hussain M., Mahtab, M. S., y Farooqi, I. H. (2020). The applications of ozone-based advanced oxidation processes for wastewater treatment: A review. *Advances in Environmental Research*, **9**(3), 191–214.
63. Hutton, B., Catalá-López, F., Moher, D. (2016). The PRISMA statement extension for systematic reviews incorporating network meta-analysis: PRISMA-NMA. *Medicina Clínica* (English Edition), **147**(6), 262– 266.
64. INEGI (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática) (2015). Base de datos del Módulo 5: Agua Potable y Saneamiento del Censo Nacional de Gobiernos Municipales y Delegacionales 2015.

65. Jurado M.A. y Mercado I.D. (2017). Revisión sistemática de técnicas no convencionales para la evaluación de la calidad del agua de ríos contaminados con plaguicidas. *Entre Ciencia e Ingeniería* **11**(21) 56-65.
66. Kitchenham, B. A., Budgen, D., y Brereton, O. P. (2011). Using mapping studies as the basis for further research—a participant-observer case study. *Information and Software Technology*, **53**(6), 638-651.
67. Kurt A., Mert B.K., Ö zengin N., Sivrioğlu, Ö. y Yonar T. (2017), Treatment of Antibiotics in Wastewater Using Advanced Oxidation Processes (AOPs), Physico-Chemical Wastewater Treatment and Resource Recovery, InTech, Rijeka, Croatia.
68. Lahlou F. Z., Mackey H. R., y Al-Ansari T. (2021). Wastewater reuse for livestock feed irrigation as a sustainable practice: A socio-environmental-economic review. *Journal of Cleaner Production*, **294**, 126331.
69. Lahlou F.-Z., Mackey H.R., McKay G., Onwusogh U. y Al-Ansari T. (2020). Water planning framework for alfalfa fields using treated wastewater fertigation in Qatar: an energy-water-food nexus approach *Comput. Chem. Eng.*, **141**, 106999
70. Last J.M. (2001). A dictionary of epidemiology. Oxford, UK: Oxford University Press.
71. Letelier S. L., Manríquez M. J. y Rada G. G. (2005). Revisiónes sistemáticas y metaanálisis: ¿son la mejor evidencia? *Revista médica de Chile*. **133**(2), 246-249.
72. Ley de Agua para el Estado de Puebla; última reforma publicada en el periódico oficial: 19 de octubre de 2015. Ley publicada en la Sección Primera del Periódico Oficial del Estado de Puebla, el 31 de diciembre del 2012. Disponible en: <http://www.ordenjuridico.gob.mx/fichaOrdenamiento.php?idArchivo=96759&ambito=estatal>
73. Liao C-H.; Lu M-C. y Su S-H. (2001) Role of cupric ions in the H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/UV oxidation of humic acids. *Chemosphere*. **44** (5) 913-919.
74. Litter M. (2005). Introduction to photochemical advanced oxidation processes for water treatment, *The Handbook of Environmental Chemistry*, 2, L:

*Environmental Photochemistry* Part II. Springer-Verlag, D. Bahnemann and P. Boule (Eds.)

75. López Z. R (2015) “Expansión urbana, agua potable y saneamiento en la zona metropolitana Puebla -Tlaxcala (ZMPT). Revista Académica Observatorio Iberoamericano del desarrollo Local y la Economía Social. El Colegio de Tlaxcala A.C., Tlaxcala, México. ISBN 1988-2483
76. Manterola C., Astudillo P., Arias E., y Claros N. (2013). Revisiones sistemáticas de la literatura. Qué se debe saber acerca de ellas. *Cirugía Española*. **91**(3), 149–155
77. Marshall C., Brereton P., Kitchenham, B. (2014). Tools to support systematic reviews in software engineering: A feature analysis.
78. Martínez E. R., Rodríguez P.F., Shuruti V.C., Sujitha S., Morales S. y Muñoz N. (2017). Monitoring the seasonal dynamics of physicochemical parameters from Atoyac River basin (Puebla), Central Mexico: multivariate approach. *Environmental Earth Sciences*. **76**(95).
79. Martínez E., Rodríguez P.F., Shuruti V.C., Sujitha S., Morales S. y Muñoz N. (2017). Monitoring the seasonal dynamics of physicochemical parameters from Atoyac River basin (Puebla), Central Mexico: multivariate approach. *Environ Earth Sci*. 76-95.
80. Mendoza, L. M. R., y Balcer, M. (2019). Microplastics in freshwater environments: A review of quantification assessment. *Trends in Analytical Chemistry*. **113**, 402 – 408.
81. Moher D., Liberati A., Tetzlaff J., Altman D.G., PRISMA Group (2009). Preferred reporting items for systematic reviews and meta-analyses: the PRISMA statement. *Ann Intern Med*, **151**, 264-269.
82. Moral Pajares E, Gallego Valero L, Román Sánchez IM. (2019) Cost of Urban Wastewater Treatment and Ecotaxes: Evidence from Municipalities in Southern Europe. *Water*. **11**(3):423.
83. Moreno B., Muñoz M., Cuellar J., Domancic S., y Villanueva J. (2018). Revisiones Sistemáticas: definición y nociones básicas. *Revista Clínica de Periodoncia, Implantología y Rehabilitación Oral*. **11**(3), 184–186.

84. Naciones Unidas (2018), La Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible: una oportunidad para América Latina y el Caribe (LC/G.2681-P/Rev.3), Santiago.
85. Norma Mexicana NMX-AA-003-1980. Muestreo de aguas residuales. Aguas residuales - Muestreo, publicada en el Diario Oficial de la Federación el 25 de marzo de 1980
86. Norma Mexicana NMX-AA-089/1-SCFI-2010. Protección al ambiente - calidad del agua, publicada en el Diario Oficial de la Federación el 29 de agosto de 2013.
87. Norma Mexicana NMX-AA-089/2-SCFI-2010 Protección al ambiente - calidad del agua publicada en el Diario Oficial de la Federación el 29 de agosto de 2013.
88. Noyola, Adalberto; Morgan-Sagastume, Juan Manuel, y Güereca, Leonor Patricia (2013). Selección de tecnologías para el tratamiento de aguas residuales municipales. Guía de apoyo para ciudades pequeñas y medianas. México: Instituto de Ingeniería-UNAM, 140
89. Ollis, D. y Ekabi H. (2000). Photocatalytic purification and remedation of contaminated air and water. Comptes Rendus de l'Académie des Sciences-Chemistry **3**(6) 405-411.
90. OMS (Organización Mundial de la Salud) (2017). Water Sanation. Consultado el 20 de enero de 2020. Disponible en: <https://www.who.int/es/news-room/detail/12-07-2017-2-1-billion-people-lack-safe-drinking-water-at-home-more-than-twice-as-many-lack-safe-sanitation>.
91. OMS (Organización Mundial de la Salud) (2019). Agua potable. Consultado el 19 de septiembre de 2021. Disponible en: <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/drinking-water>.
92. ONU (Organización de las Naciones Unidas) (2018). Informe de los Objetivos de Desarrollo Sostenible 2018. Naciones Unidas. Nueva York. eISBN: 978-92-1-363319-9.
93. ONU (Organización de las Naciones Unidas) y WWAP (World Water Assessment Programme) (2009). United Nations World Water Assessment

Programme. The World Water Development Report 3: Water in a Changing World. UNESCO: Paris, France.

94. Pablos C., Marugán R., Van G. y Serrano E. (2013). Emerging micropollutant oxidation during disinfection processes using UV-C, UV-C/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, UV-A/TiO<sub>2</sub> and UV-A/TiO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>. *Water Res.* **47** 1237- 1245
95. PADHPOT. (2012). Programa de apoyo al desarrollo hidráulico de los estados de Puebla, Oaxaca y Tlaxcala. Acceso [Enero, 2020]. Disponible en: <http://www.agua.unam.mx/padhpot/puebla.html>
96. Paucar N.E., Kim, I., Tanaka, H. y Sato, C. (2019). Ozone treatment process for the removal of pharmaceuticals and personal care products in wastewater. *Ozone Sci. Eng.*, **41**(1), 3-16.
97. Pérez Castresana G., Tamariz Flores V., López Reyes L., Hernández Aldana F., Castelán Vega R., Moran Perales J. L., García Suastegui W. A., Díaz Fonseca A. y Handal Silva A. (2018). Atoyac River Pollution in the Metropolitan Area of Puebla, México. *Water 2018*, **10** (3), 267; ISSN 2073-4441.
98. Periódico Oficial Gobierno Constitucional del estado de Puebla, 2012. Declaratoria de Área Natural Protegida de Jurisdicción Estatal en la modalidad de Parque Estatal denominada "Humedal Valsequillo" Disponible en: [http://conacyt.gob.mx/cibiogem/images/cibiogem/sistema\\_nacional/documentos/ANPL/Pue/Declaratoria-ANP-ValsequilloMOD.pdf](http://conacyt.gob.mx/cibiogem/images/cibiogem/sistema_nacional/documentos/ANPL/Pue/Declaratoria-ANP-ValsequilloMOD.pdf)
99. Petticrew, M., y Roberts, H. (2005). Systematic reviews in the social sciences: A practical guide. New York, NY: John Wiley & Sons.
100. Polit, D. y Hungler, B. (2000) Investigación Científica: en ciencias de la salud. México: McGraw-Hill. (6ª ed.).
101. Polo L. M., García F., Oller I. y Fernández I. (2011). Solar disinfection of fungal spores in water aided by low concentrations of hydrogen peroxide. *Photochem. Photobiol. Sci.* **10** 381- 388.

102. Prasse C., Stalter D., Schulte Oehlmann, U., Oehlmann J. y Ternes T.A. (2015) A critical review on the chemical and biological assessment of current wastewater treatment technologies. *Water Research* **87**, 237-270.
103. Programa Municipal de Desarrollo Urbano Sustentable de Puebla, 2011. H. Ayuntamiento de Puebla. pp 245. Disponible en: <http://www.pueblacapital.gob.mx/work/sites/pue/resources/LocalContent/476/5/tomo2.pdf>.
104. Qu, J., Wang, H., Wang, K. Yu G., Ke B., Yu H., Ren H., Zheng X., Li J., Li W., Gao S. y Gong H. (2019). Municipal wastewater treatment in China: Development history and future perspectives. *Front. Environ. Sci. Eng.* **13**, 88.
105. Quintero A. A. C., Vargas T. C.A. y Sanaria A. J. P. (2017). Evaluation of a Heterogeneous Photocatalysis and pasteurization system rainwater disinfection. *Ciencia e ingeniería Neogranadina.* **18**
106. Reglamento de la Ley de Aguas Nacionales; Nuevo Reglamento publicado en el Diario Oficial de la Federación el 12 de enero de 1994; Última reforma publicada DOF 25-08-2014. Disponible en: [http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/regley/Reg\\_LAN\\_250814.pdf](http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/regley/Reg_LAN_250814.pdf).
107. Rekhate C. V. y Srivastava J.K. (2020). Recent advances in ozone-based advanced oxidation processes for treatment of wastewater- A review. *Chemical Engineering Journal Advances.* 100031.
108. Rizzo, L., Gernjak, W., Krzeminski, P., Malato, S., McArdell, C. S., Perez, J. A. S., ... Fatta-Kassinos, D. (2019). Best available technologies and treatment trains to address current challenges in urban wastewater reuse for irrigation of crops in EU countries. *Science of The Total Environment*, 136312.
109. Rodero M. H. (2014). La búsqueda bibliográfica, pilar fundamental de la medicina basada en la evidencia: evaluación multivariante de las enfermedades nutricionales y metabólicas. (PhD), Universidad Miguel Hernández, Alicante, España. Disponible en: <http://dspace.umh.es/handle/11000/1639>

110. Rodríguez M., Sarria V., Esplugas S. y Pulgarin, C. (2002). Photo-Fenton treatment of a biorecalcitrant wastewater generated in textile activities; biodegradability of the photo-treated solution. *J. Photochem and photobio. A.*, **151**,129-135.
111. Roldán G. (2003). Bioindicación de la calidad del Agua en Colombia. Universidad de Antioquia, Colombia. 170 pp
112. Rose B. J. y Hernández Balzac, A. (2013). Valsequillo: humedal de importancia internacional. *Saberes y Ciencias*.**16** (2) Pp.7
113. Rueda M. J. J., Levchuk I., Fernández I. P., y Sillanpää, M. (2020). A critical review on application of photocatalysis for toxicity reduction of real wastewaters. *Journal of Cleaner Production*, 120694.
114. Sánchez-Meca, J. (2010). Cómo realizar una revisión sistemática y un meta-análisis. *Aula Abierta*, **38** (2):53-64. ICE. Universidad de Oviedo
115. Sauvé, S. y Desrosiers, M. A review of what is an emerging contaminant. *Chemistry Central Journal*, **8** (15), 1-7.
116. Schwarzenbach R. P., Egli H., Von G. y Wehrli B. (2010). Global Water Pollution and Human Health. *Revisión anual de medio ambiente y recursos* **35**:109-136.
117. Sillanpää, M. (2015). Natural organic Matter in Water. 1<sup>st</sup> Edition- Characterization and Treatment Methods. Butterworth-Heinemann.
118. Sillanpää, M., Ncibi, M. C., y Matilainen, A. (2018). Advanced oxidation processes for the removal of natural organic matter from drinking water sources: A comprehensive review. *Journal of Environmental Management*, **208**, 56–76
119. Silva, M. A. D. y Cerejeira M. J. (2015) Aquatic risk assessment of priority and other river basin specific pesticides in surface waters of Mediterranean river basins. *Chemosphere*. **135**, 394– 402.
120. Singh A., Kumar S. R., Agrawal M. (2010). Risk assessment of heavy metal toxicity through contaminated vegetables from wastewater irrigated area of Varanasi, India. *Tropical Ecology*, **51**(2), 375-378.

121. Snyder H. (2019) Literature review as a research methodology: An overview and guidelines. *Journal of Business Research*. **(104)**, 333-339.
122. Snyder, H. (2019). Literature review as a research methodology: An overview and guidelines. *Journal of Business Research*. **104**, 333–339.
123. Solmaz S. K., Azak H. y Morsunbul T. (2012). A comparative study of the removal of 3-indolebutyric acid using advanced oxidation processes. *Water Environment Research*. **84(2)**: 100–107
124. Spellman, Frank R. (2014) *Water and wastewater treatment operations*, London: CRC Press
125. Torres R., Sarria V., Torres W., Péringer P., y Pulgarín C. (2003). Electrochemical treatment of industrial wastewater containing 5-amino-6-methyl-2-benzimidazolone: toward an electrochemical-biological coupling. *Water Res.* **37**, 3118.
126. Tranfield, D., Denyer, D., y Smart, P. (2003). Towards a methodology for developing evidence-informed management knowledge by means of systematic review. *British Journal of Management*. **14**, 207–222
127. Urrutia G., Tort S. y Bonfill X. (2005). Meta-analyses (QUOROM). *Med Clin (Barc)*, **125**, 32-37.
128. USAID Center for Development and Information Evaluation (December 1996). *Conducting Key Informant Interviews*. Disponible en: [http://www.dec.org/pdf\\_docs/pnabs541.pdf](http://www.dec.org/pdf_docs/pnabs541.pdf)
129. Vargas I. (2012). La entrevista en la investigación cualitativa: nuevas tendencias y retos. *Revista CAES*. **3(1)**:119-39.
130. Wang W.L., Wu Q.Y., Huang N., Xu Z.B., Lee M.Y., y Hu H.Y. (2018). Potential risks from UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> oxidation and UV photocatalysis: A review of toxic, assimilable, and sensory-unpleasant transformation products. *Water Research*, **141**, 109–125.
131. Wang Y., Li H Q. y Ren L. (2019). Organic matter removal from mother liquor of gas field wastewater by electro-Fenton process with the addition of H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>: effect of initial pH. *Royal Society Open Science*, **6** (12): 191304

132. Webster, J., y Watson, R. T. (2002). Analyzing the past to prepare for the future: Writing a literature review. *Management Information Systems Quarterly*. **26** (3).
133. Wei K. T. (2006) Industrial wastewater treatment. Published by *Imperial Collage Press*. Singapur. ISBN 1-86094-580-5
134. WWAP (United Nations World Water Assessment Programme) (2018). The United Nations World Water Development Report 2018: Nature-based Solutions. Paris, UNESCO.
135. WWDR (The United Nations World Water Development Report 'Water for people Water for life') (2017). "Enfermedades transmitidas por el agua contaminada".
136. Xu Y., Lin Z., y Zhang H. (2016). Mineralization of sucralose by UV-based advanced oxidation processes: UV/PDS versus UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>. *Chemical Engineering Journal*. **285**, 392–401.
137. Yang Y., Song F., Chang K., (2020). Evaluation of chemistry and key reactor parameters for industrial water treatment applications of the UV/O<sub>3</sub> process, *Environ. Res.*
138. Zamora L. J. (2014). "Los servicios de agua potable y saneamiento en la ciudad de Puebla". Puebla, México. BUAP.

## ANEXO 1

### (A) Los expertos en consulta.

**Opinión de experto.** La revista de la CEPAL (Comisión Económica para América Latina) muestra un artículo titulado “la opinión de expertos como instrumento para evaluar la inversión en educación primaria” de los autores Schiefelbein, Ernesto, Wolf Laurence y Schiefelbein, Patricia. (2000) Revista de la CEPAL (72). Santiago de Chile.

**Criterio de experto.** La autora Sandra Hurtado de Mendoza Fernández, publica en la página web Histodidáctica de la Universidad de Barcelona un artículo donde explica el criterio de experto en su origen y procedimiento a través del método Delphi.

**Entrevista de experto.** Universidad de San Sebastián .Dirección de innovación y emprendimiento muestra un estudio relacionado con la entrevista como una herramienta cualitativa que permite obtener información de experto sobre un tema en específico en el que se necesita profundizar y califica este procedimiento como” “entrevista de experto” Fuente: <https://www.uss.cl/diee/innovakit/entrevista-con-expertos/#:~:text=La%20entrevista%20es%20una%20herramienta,el%20que%20se%20necesite%20profundizar.&text=Se%20recomienda%20estructurar%20previamente%20por,hacer%20todas%20las%20preguntas%20necesarias>

**Juicio de expertos.** En un documento de la Comisión de Seguridad de España, titulado “Juicio de experto” los autores Bolado, Ricardo, Ibáñez, Jesús y Lantarón Alfredo (1998) explican los antecedentes, necesidad y las técnicas y protocolo del juicio de expertos. El documento da a conocer cómo surge en los EEUU este tipo de consulta en el momento en que no había ninguna literatura acerca de los riesgos del empleo de los reactores nucleares comerciales y ante esta incertidumbre se decidió emplear el llamado “juicio de expertos cuando los datos acerca de este problema eran insuficiente.

**Consulta de expertos.** El especialista coordinador del programa de investigación de la Universidad pedagógica de Durango, Barraza Macías, Arturo publicó un artículo de “La consulta de expertos como estrategia para la recolección de evidencias de validez basado en el contenido”., en la revista INED No.7 de septiembre de 2007.

## **(B) Entrevistas a expertos:**

Entrevista E1:

1. Por el tiempo que tiene estudiando el efluente de Valsequillo ¿Cuál considera que sea el mayor desafío para el tratamiento de las aguas residuales de la presa?
2. De acuerdo con los estudios en los procesos fotoquímicos, ¿considera que sean una buena herramienta para la descontaminación de las aguas residuales de la presa de Valsequillo?
3. Dada la alta presencia de metales pesados y de contaminantes emergentes en la presa de Valsequillo ¿Cuál considera que sea el mayor desafío para su tratamiento con los procesos fotoquímicos?
4. ¿Sería posible descontaminar el agua residual de Valsequillo a mediano plazo con la utilización de los procesos fotoquímicos?

Entrevista E2:

1. Por el tiempo que tiene estudiando el efluente de Valsequillo ¿Cuál considera que sea el mayor desafío para el tratamiento de las aguas residuales de la presa?
2. ¿Qué técnicas de descontaminación considera adecuadas para la purificación de las aguas residuales de Valsequillo?
3. ¿Considera a los tratamientos fotoquímicos como una posible herramienta de descontaminación de las aguas residuales?

4. ¿Qué tan importante considera la purificación de las aguas residuales del efluente para los organismos acuáticos presentes, la reutilización en la agricultura y para la población cercana?

## ANEXO 2

### a) Referencias bibliográficas utilizadas en la revisión sistemática

1. Abass, M., Buabeng B. E., Nezungai, D., Mafukidze, N. y Majozi, T. (2015). Optimization of complex integrated Water and membrane network systems. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. **115**. 1143-1158.
2. Afzal, A., Drzewicz, P., Martin, J. W., y Gamal El-Din, M. (2012). Decomposition of cyclohexanoic acid by the UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> process under various conditions. *Science of The Total Environment*, **426**, 387–392
3. Almansa O., Machuca M. y Manyoma V., (2020) "Análisis multicriterio para la selección de tecnologías avanzadas de oxidación en el tratamiento de contaminantes emergentes", *Respuestas*. **25** (2) 16-25.
4. Amor C., Fernandes J. R., Lucas M.S., Peres A. S, (2020). Hydroxyl and sulfate radical advanced oxidation processes: Application to an agro-industrial wastewater, *Environmental Technology & Innovation*.
5. Arslan A., Veli S., y Bingöl D. (2014). Use of response surface methodology for pretreatment of hospital wastewater by O<sub>3</sub>/UV and O<sub>3</sub>/UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> processes. *Separation and Purification Technology*, **132**, 561–567.
6. Arslan, A., Eylem T., Deniz B. y Sevil V. (2018). Removal of anionic surfactant sodium dodecyl sulfate from aqueous solutions by O<sub>3</sub>/UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> advanced oxidation process: Process optimization with response surface methodology approach. *Sustainable Environment Research*. **28**(2). Pp 65-71.
7. B Tsybikova (2020). Photooxidation based on UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> process for arsenic removal from aqueous solutions. IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 962 042080

8. Bachmann P., Souza H., y Dezotti M. (2018). Treatment of a pesticide industry wastewater mixture in a moving bed biofilm reactor followed by conventional and membrane processes for water reuse. *Journal of Cleaner Production*, **201**, 1061–1070.
9. Baeza, C., y Knappe, D. R. U. (2011). Transformation kinetics of biochemically active compounds in low-pressure UV Photolysis and UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> advanced oxidation processes. *Water Research*, **45(15)**, 4531–4543.
10. Bagheri, M. y Mohseni, M. (2015). Impacto de la hidrodinámica en la degradación de contaminantes y la eficiencia energética de los procesos de oxidación VUV / UV y H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> / UV. *Journal of Environmental Management*, **164**, 114-120
11. Biñ A. K., y Sobera M. S. (2012). Comparison of the Advanced Oxidation Processes (UV, UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> and O<sub>3</sub>) for the Removal of Antibiotic Substances during Wastewater Treatment. *Ozone: Science & Engineering*, **34(2)**, 136–139.
12. Borba, F. H., Schmitz, A., Pellenz, L., Bueno, F., Kasper, N., Wenzel, B. M., Módenes, A. N. (2018). Genotoxicity and by-products assessment in degradation and mineralization of ciprofloxacin by UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> process. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, **6(6)**, 6979-6988
13. Botelho R. D., Rodríguez C. T y Pires E. C. (2012). Advanced oxidation process UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> combined with anaerobic digestion to remove chlorinated organics from bleached kraft pulp mill wastewater. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia* (**63**) 43-54.
14. Brião V.B., Magoga J., Hemkemeier M., Brião E.B., Girardelli L., Sbeghen L. y Favaretto, DPC (2014). Ósmosis inversa para desalación de agua del Sistema Acuífero Guaraní para producir agua potable en el sur de Brasil. *Desalination*, **344**, 402–411
15. Bunani S., Yörükoğlu E., Yüksel Ü., Kabay N., Yüksel M., y Sert, G. (2015). Application of reverse osmosis for reuse of secondary treated urban wastewater in agricultural irrigation. *Desalination*, **364**, 68–74.

16. Casierra M., Henry C. B., Jafeth V. R. X. y Caselles O. A. (2016). Desinfección de agua residual doméstica mediante un sistema de tratamiento acoplado con fines de reúso. *Tecnología y ciencias del agua*, **7**(4), 97-111.
17. Chávez R., Cortés P., E., y Rojas A. R. (2016). Treatment of seawater for rotifer culture uses applying adsorption and advanced oxidation processes. *Latin american journal of aquatic research*, **44**(4), 779-791.
18. Chuanxi Yang, Xiaoning Wang, Lingli Zhang, Wenping Dong, Cheng Yang, Xifeng Shi, Yuqi Fan, Ying Wang, Haojie Lv, Weiliang Wang, Yingqiang Zhao (2020). Investigation of kinetics and mechanism for the degradation of antibiotic norfloxacin in wastewater by UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*. **115**, 117-127.
19. Córdova M. A., Gómez S. Y., Riera M. A., Rodríguez D. J. M. y Pereda R. (2019). Influencia de los procesos oxidativos avanzados en la digestión anaerobia de aguas residuales de la industria del café. *Centro Azúcar*, **46**(2), 89-100.
20. Krakkó D., Ádám I., Licul K., Bence D., Dobosy P., Pogonyi A., Attila D., G. Mihucz S. D., Gyula Z. (2021) Application of (V)UV/O<sub>3</sub> technology for post-treatment of biologically treated wastewater: A pilot-scale study. *Chemosphere*, **275**
21. Deng X., Zhang D., Wu M., Antwi P., Su H. y Lai C. Enhanced removal of refractory pollutant from aniline aerofloat wastewater using combined vacuum ultraviolet and ozone (VUV/O<sub>3</sub>) process. *Water Sci Technol*. **80**(12), 2250-2259.
22. Dévora I., Germán E., López M. M., Fimbres W. G., Álvarez S. J. y Astorga T. S. (2016). Desalación por ósmosis inversa y su aprovechamiento en agricultura en el valle del Yaqui, Sonora, México. *Tecnología y ciencias del agua*, **7**(3), 155-169.
23. F. Piras, O. Santoro, T. Pastore, I. Pio, E. De Dominicis, E. Gritti, R. Caricato, M.G. Lionetto, G. Mele, D. Santoro (2020) Controlling micropollutants in tertiary municipal wastewater by O<sub>3</sub>/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, granular biofiltration and UV254/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> for potable reuse applications. *Chemosphere*. **239**.

24. Faria, Paulo Gil Siqueira de, Nagalli, André, Freire, Flavio Bentes, y Riella, Miguel Carlos. (2016). Reaproveitamento do concentrado gerado por sistema de tratamento de água por osmose reversa em uma clínica de hemodiálise. *Engenharia Sanitaria e Ambiental*, **21**(2), 329-336
25. Felis E, Miksch K. (2015) Nonylphenols degradation in the UV, UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, O<sub>3</sub> and UV/O<sub>3</sub> processes - comparison of the methods and kinetic study. *Water Sci Technol*. **71**(3) 446-53.
26. Feng H., Liu M., Zeng W. y Chen Y. (2021). Optimization of the O<sub>3</sub>/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> process with response surface methodology for pretreatment of mother liquor of gas field wastewater. *Frontiers of Environmental Science & Engineering*. **15**
27. Frena, Morgana, Oliveira, Cristiane R., Silva, Cesar A. da, Madureira, Luiz A. S., y Azevedo. (2014). Photochemical degradation of diesel oil in water: a comparative study of different photochemical oxidation processes and their degradation by products. *Journal of the Brazilian Chemical Society*, **25**(8), 1372-1379
28. Gil P. E., Medina J., Dobrosz G. I. y Gómez M. Á. (2016). Degradación de Colorante Amarillo 12 de Aguas Residuales Industriales utilizando Hierro Cero Valente, Peróxido de Hidrógeno y Radiación Ultravioleta. *Información tecnológica*, **27**(3), 23-34.
29. Gonçalves L.V., Azevedo E.B., de Aquino F.R., Bila D.M., Sant'Anna G.L. y Dezotti M. (2016) Treatment of an industrial stream containing vinylcyclohexene by the UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> process. *Environ Sci Pollut*
30. Gong, P., Yuan, H., Zhai, P., Xue, Y., Li, H., Dong, W., y Mailhot, G. (2015). Investigation on the degradation of benzophenone-3 by UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> in aqueous solution. *Chemical Engineering Journal*, **277**, 97–103.
31. Gorito A. M., Joana F.J.R. Pesqueira, Nuno F.F. Moreira, Ana R. Ribeiro, M. Fernando R. Pereira, Olga C. Nunes, C. Marisa R. Almeida y Adrián M.T. Silva (2021) Ozone-based water treatment (O<sub>3</sub>, O<sub>3</sub>/UV, O<sub>3</sub>/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) for removal of organic micropollutants, bacteria inactivation and regrowth prevention. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, **9** (4) 105-315

32. Gu, D., Guo, C., Feng, Q., Zhang, H., y Xu, J. (2020). Degradation of ketamine and methamphetamine by the UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> system: Kinetics, mechanisms and comparison. *Water (Switzerland)*, **12**(11), 1-13.
33. H. Zangeneh, A.A.L. Zinatizadeh, M. Feizy, (2014). A comparative study on the performance of different advanced oxidation processes (UV/O<sub>3</sub>/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) treating linear alkyl benzene (LAB) production plant's wastewater. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*. **20**(4) 1453-1461
34. Hadiyanto H., Marcelinus C., Detian I. P., Silviana S., Muhammad S. y Adian K. (2020) Rubber wastewater treatment using UV, ozone, and UV/ O<sub>3</sub> and its effluent potency for microalgae *Spirulina platensis* cultivation medium. *Cogent Engineering*, **7**(1).
35. Hajar F., Kavithaa L., Jayaprakash S., Gordon M. O. y ozone/hydrogen peroxide treatment to remove gemfibrozil and ibuprofen from treated sewage effluent: Factors influencing bromate formation. *Emerging Contaminants*. **6**, 225-234.
36. Hamdi El Najjar, N., Touffet, A., Deborde, M., Journal, R., y Leitner, N. K. V. (2013). Levofloxacin oxidation by ozone and hydroxyl radicals: Kinetic study, transformation products and toxicity. *Chemosphere*, **93**(4), 604–611.
37. Hassanshahi N, Karimi-Jashni A. (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. *Ecotoxicol Environ Saf*. **161**, 683-690
38. He, X., Pelaez, M., Westrick, J. A., O'Shea, K. E., Hiskia, A., Triantis, T., ... Dionysiou, D. D. (2012). Efficient removal of microcystin-LR by UV-C/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> in synthetic and natural water samples. *Water Research*, **46**(5), 1501–1510.
39. Hollman J.; Albino J.; Dominic, Gopal A.; Cooper H. y Joo-Hwa T. (2018): Effect of UV dose on degradation of venlafaxine using UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>: perspective of augmenting UV units in wastewater treatment, *Environmental Technology*
40. Huang, H., Yu, H. F., y Liu, G. M. (2013). Ballast Waters Treatment Using UV/(H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>+O<sub>3</sub>) Advanced Oxidation Process with *Heterosigma akashiwo*, *Pyramimonas* sp., and *Escherichia coli* as Indicator Microorganism. *Advanced Materials Research*. **663**, 946–952.

41. Huang, Y., Kong, M., Coffin, S., Cochran, K. H., Westerman, D. C., Schlenk, D., Dionysiou, D. D. (2020). Degradation of contaminants of emerging concern by UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> for water reuse: Kinetics, mechanisms, and cytotoxicity analysis. *Water Research*, **174**
42. Hua-wei Wang, Xiao-yue Li, Zhi-peng Hao, Ying-jie Sun, Ya-nan Wang, Wei-hua Li, Yiu Fai Tsang, (2017) Transformation of dissolved organic matter in concentrated leachate from nanofiltration during ozone-based oxidation processes (O<sub>3</sub>, O<sub>3</sub>/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> and O<sub>3</sub>/UV). *Journal of Environmental Management*. **191**, 244-251
43. Im, J.K., Cho, I.H., Kim, S.K., y Zoh, K.D. (2012). Optimization of carbamazepine removal in O<sub>3</sub>/UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> system using a response surface methodology with central composite design. *Desalination*, **285**, 306–314.
44. Jaramillo Sierra, B., Mercado Cabrera, A., Hernández Arias, A. N., Peña Eguiluz, R., López Callejas, R., Rodríguez Méndez, B. G., y Valencia-Alvarado, R.. (2019). Methylene blue degradation assessment by advanced oxidation methods. *Journal of applied research and technology*, **17**(3), 172-179.
45. Jasim B., Al Furaiji M., Sakran A. y Abdullah W. (2020). A Competitive Study Using UV and Ozone with H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> in Treatment of Oily Wastewater. *Baghdad Science Journal*. **17**. 1177-1182.
46. Kaplan A., Mamane H., Lester Y. y Avisar D. (2020). Trace organic compound removal from wastewater reverse-osmosis concentrate by advanced oxidation processes with UV/O<sub>3</sub>/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>. *Materials*. **13**, 2785.
47. Katsoyiannis IA, Canonica S, von Gunten U. (2011). Efficiency and energy requirements for the transformation of organic micropollutants by ozone, O<sub>3</sub>/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> and UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>. *Water Res.* **45**(13), 3811-22
48. Kern, DI, Schwaickhardt, R. de O., Mohr, G., Lobo, EA, Kist, LT y Machado, Ê. L. (2013). Toxicity and genotoxicity of hospital laundry wastewaters treated with photocatalytic ozonation. *Science of The Total Environment*. **443**, 566–572.

49. Lakretz A., Mamane H., Asa E., Harif T. y Herzberg M. (2018). Biofouling control by UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> pretreatment for brackish water reverse osmosis process. *Environmental Science: Water Research & Technology*. **4**. 10.1039/C8EW00183A.
50. Lee, M., Merle, T., Rentsch, D., Canonica, S., y Von Gunten, U. (2017). Abatement of polychloro-1,3-butadienes in aqueous solution by ozone, UV photolysis, and advanced oxidation processes (O<sub>3</sub>/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> and UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>). *Environmental Science and Technology*, **51**(1), 497-505.
51. Lester Y, Avisar D, Gozlan I, Mamane H. (2011) Removal of pharmaceuticals using combination of UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/O<sub>3</sub> advanced oxidation process. *Water Sci Technol*. **64**(11), 2230-2238
52. Liu, Z., Hosseinzadeh, S., Wardenier, N., Verheust, Y., Chys, M., y Van Hulle, S. (2018). Combining ozone with UV and H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> for the degradation of micropollutants from different origins: lab-scale analysis and optimization. *Environmental Technology*. 1–10
53. Loaiza J M., León M. C., Rubio A., Rodríguez D.C. y Peñuela G. A. (2020) "Efficiency of the removal of microcystin-LR by UV-radiation and hydrogen peroxide", *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, **95**, 9-19.
54. López-Peñalver, JJ, Sánchez-Polo, M., Gómez-Pacheco, CV y Rivera-Utrilla, J. (2010). Fotodegradación de tetraciclinas en solución acuosa mediante procesos de oxidación UV y UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>. *Revista de tecnología química y biotecnología*, **85** (10), 1325-1333
55. Lu, Jian, Zhu, Guangcan, Lu, Xiwu, Yang, Zhonglian (2015) Characteristics of UV-Micro O<sub>3</sub> Reactor and Its Application to Microcystins Degradation during Surface Water Treatment. *Journal of Chemistry*.
56. Lucas, M. S., Peres, J. A., y Li Puma, G. (2010). Treatment of winery wastewater by ozone-based advanced oxidation processes (O<sub>3</sub>, O<sub>3</sub>/UV and O<sub>3</sub>/UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) in a pilot-scale bubble column reactor and process economics. *Separation and Purification Technology*, **72**(3), 235–241.

57. Malvestiti JA, Fagnani E, Simão D, Dantas RF. Optimization of UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> and ozone wastewater treatment by the experimental design methodology. *Environ Technol.* **40**(15), 1910-1922.
58. Mandavgane, s y Yenkie, M.. (2011). Degradation of salicylic acid by UV, UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, UV/O<sub>3</sub>, photofenton processes. *Rasayan Journal of Chemistry.* **4.** 640-647.
59. Medellín C., Ocampo P., Leyva R., Sánchez P., Rivera U. y Méndez D. (2013). Removal of diethyl phthalate from water solution by adsorption, photo-oxidation, ozonation and advanced oxidation process (UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> and O<sub>3</sub>/activated carbon). *Science of The Total Environment.* **442**, 26-35
60. Miklos, D. B., Hartl, R., Michel, P., Linden, K. G., Drewes, J. E., & Hübner, U. (2018). UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> process stability and pilot-scale validation for trace organic chemical removal from wastewater treatment plant effluents. *Water Research*, **136**, 169–179.
61. Mofrad, M., Pourzamani, H., Amin, M., Parseh, I. y Alipour, M. (2020). In situ treatment of metalworking wastewater by chemical addition-dissolved air flotation coupled with UV, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> & ZnO. *Heliyon.***6**.
62. Moreira CG, Moreira MH, Silva VMOC, Santos HG, Bila DM, Fonseca FV. (2019) Treatment of Bisphenol A (BPA) in water using UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> and reverse osmosis (RO) membranes: assessment of estrogenic activity and membrane adsorption. *Water Sci Technol.* **80**(11), 2169-2178.
63. Ochando-Pulido, J. M., Rodríguez-Vives, S., Hodaifa, G., y Martínez-Ferez, A. (2012). Impacts of operating conditions on reverse osmosis performance of pretreated olive mill wastewater. *Water Research*, **46**(15), 4621–4632
64. Oh BT, Seo YS, Sudhakar D, Choe JH, Lee SM, Park YJ, Cho M. (2014). Oxidative degradation of endotoxin by advanced oxidation process (O<sub>3</sub>/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> & UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>). *J Hazard Mater.*
65. Ortiz-Marin, A. D., Amabilis-Sosa, L. E., Bandala, E. R., Guillén-Garcés, R. A., Treviño-Quintanilla, L. G., Roé-Sosa, A., & Moeller-Chávez, G. E. (2020). Using sequentially coupled UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>-biologic systems to treat

- industrial wastewater with high carbon and nitrogen contents. *Process Safety and Environmental Protection*. **137**, 192-199,
66. Pereira R. J.; Tome de Oliveira J.; Gadelha O. A; Fares E. (2013). Degradation of dye red remazol rb by UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>. *Revista AIDIS*. **6**(3) 76-86
67. Petrinic, I., Korenak, J., Povodnik, D., y Hélix-Nielsen, C. (2015). A feasibility study of ultrafiltration/reverse osmosis (UF/RO)-based wastewater treatment and reuse in the metal finishing industry. *Journal of Cleaner Production*, **101**, 292–300.
68. Pouloupoulos SG, Yerkinova A, Ulykbanova G, Inglezakis VJ (2019) Photocatalytic treatment of organic pollutants in a synthetic wastewater using UV light and combinations of TiO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> and Fe(III). *PLoS ONE* **14**(5): e0216745.
69. Pourgholi M, Masoomi Jah izi R , Miranzadeh MB (2018) Removal of Dye and COD from Textile wastewater Using AOP (UV/O<sub>3</sub>, UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> and UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/O<sub>3</sub>). *J Environ Health Sustain Dev*. **3**(4) 630-6
70. Qiang, Z., Liu, C., Dong, B., y Zhang, Y. (2010). Degradation mechanism ofalachlor during direct ozonation and O<sub>3</sub>/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> advanced oxidation process. *Chemosphere*, **78**(5), 517–526.
71. Rezaee R, Maleki A, Jafari A, Mazloomi S, Zandsalimi Y, Mahvi AH. (2014) Application of response surface methodology for optimization of natural organic matter degradation by UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> advanced oxidation process. *J Environ Health Sci Eng*.
72. Rios, Fabian y Forero, Jorge y Ortiz Cancino, Olga. (2005). Aplicación de procesos de oxidación avanzada como tratamiento de fenol en aguas residuales industriales de refinería. *CT&F Ciencia, Tecnología y Futuro*. **3**. 97-109.
73. Rodríguez T., Botelho D. y Cleto E. (2008). Tratamiento de efluentes industriales de naturaleza recalcitrante usando ozono, peróxido de hidrógeno y radiación ultravioleta. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, **(46)**, 24-38.

74. Rosario-Ortiz, FL, Wert, EC y Snyder, SA (2010). Evaluación del tratamiento UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> para la oxidación de fármacos en aguas residuales. *Water Research*, **44** (5), 1440–1448
75. Rott E, Kuch B, Lange C, Richter P, Kugele A, Minke R. (2018) Removal of Emerging Contaminants and Estrogenic Activity from Wastewater Treatment Plant Effluent with UV/Chlorine and UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> Advanced Oxidation Treatment at Pilot Scale. *Int J Environ Res Public Health*. 7;15(5):935
76. Rubio C. A., Chica E. y Peñuela G. A. (2017) H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> Bades Adanced oxidation processes for water pollutant decontamination. H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> as indicator of the effectiveness of the UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> system. *Ecology & Safety*. **11** 282-289
77. Sabri, Siti Nasuha, Abidin, Che Zulzikrami Azner, Ridwan, Fahmi Kow, SH y Razali, Nur Aqilah. (2018). The performance and decolourization kinetics of O<sub>3</sub>/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> oxidation of reactive green 19 dye in wastewater. E3S Web of Conferences. 34. 02039
78. Sanches, S., Barreto Crespo, M. T., & Pereira, V. J. (2010). Drinking water treatment of priority pesticides using low pressure UV photolysis and advanced oxidation processes. *Water Research*, **44**(6), 1809–1818.
79. Semitsoglou-Tsiapou, S., Templeton, M. R., Graham, N. J. D., Hernández Leal, L., Martijn, B. J., Royce, A., y Kruithof, J. C. (2016). Low pressure UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> treatment for the degradation of the pesticides metaldehyde, clopyralid and mecoprop – Kinetics and reaction product formation. *Water Research*, **91**, 285–294.
80. Seo C., Shin J., Lee M., Lee W., Yoom H., Son H., Jang S. y Lee Y.(2019). Elimination efficiency of organic UV filters during ozonation and UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> treatment of drinking water and wastewater effluent. *Chemosphere*. **230**, 248-257
81. Shu, Z., Bolton, J. R., Belosevic, M., & Gamal El Din, M. (2013). Photodegradation of emerging micropollutants using the medium-pressure UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> Advanced Oxidation Process. *Water Research*, **47**(8), 2881–2889.

82. Souza, Renata Cristina, Silva, Thiago Lopes da, Santos, Alessandra Zacarias dos, y Tavares, Célia Reginha Granhen. (2019). Tratamiento de efluentes de lavandería hospitalar por proceso oxidativo avanzado: UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>. *Engenharia Sanitaria e Ambiental*, **24**(3), 601-611.
83. Surbhi Tak, Bhanu Prakash Vellanki (2020) Comparison of O<sub>3</sub>-BAC, UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>-BAC, and O<sub>3</sub>/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>-BAC treatments for limiting the formation of disinfection byproducts during drinking water treatment in India. *Journal of Environmental Chemical Engineering*.
84. Tan, C., Gao, N., Deng, Y., Zhang, Y., Sui, M., Deng, J., y Zhou, S. (2013). Degradation of antipyrine by UV, UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> and UV/PS. *Journal of Hazardous Materials*, **260**, 1008–1016.
85. Urbina J., Vera S., (2020). Los contaminantes emergentes de las aguas residuales de la industria farmacéutica y su tratamiento por medio de la ozonización. *Informador Técnico*, **84**(2), 249-263
86. Valencia, C., Pedroza-Rodríguez, A., Chamorro Tobar, I., Zambrano, D., y Carrascal Camacho, A. (2020). Evaluación de la fotólisis, fotólisis/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> como tratamientos para la reducción de *Salmonella* spp en aguas de granjas porcícolas. *Revista De Investigaciones Veterinarias Del Perú*, **31**(4), e17205.
87. Wang, B., Wang, X., Hu, Y., Chang, M., Bi, Y., y Hu, Z. (2015). The combined effects of UV-C radiation and H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> on *Microcystis aeruginosa*, a bloom-forming cyanobacterium. *Chemosphere*, **141**, 34–43.
88. Wardenier, N., Liu, Z., Nikiforov, A., Van Hulle, S. W. H., & Leys, C. (2019). Micropollutant elimination by O<sub>3</sub>, UV and plasma-based AOPs: An evaluation of treatment and energy costs. *Chemosphere*. **234**. 715-724,
89. Wols, BA, Hofman-Caris, CHM, Harmsen, DJH y Beerendonk, EF (2013). Degradación de 40 productos farmacéuticos seleccionados por UV / H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>. *Water Research*, **47** (15), 5876–5888.
90. X. Dai, Z. Xie, B. Dorian, S. R. Gray and J. Zhang (2019). Comparative study of PFAS treatment by UV, UV/ozone, and 2 fractionations with air and ozonated air. *Environ. Sci.: Water Res. Technol.*

91. Xiang Tu, Xiaoyang Meng, Yang Pan, John C. Crittenden, Yaye Wang (2020) Degradation kinetics of target compounds and correlations with spectral indices during UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> post-treatment of biologically treated acrylonitrile wastewater, *Chemosphere*. **243**,
92. Xu, Y., Lin, Z. y Zhang, H. (2016). Mineralización de sucralosa por procesos de oxidación avanzados basados en UV: UV / PDS versus UV / H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>. *Chemical Engineering Journal*, **285**, 392–401
93. Xu, Y., Wu, Y., Zhang, W., Fan, X., Wang, Y. y Zhang, H. (2018). Performance of artificial sweetener sucralose mineralization via UV/O<sub>3</sub> process: Kinetics, toxicity and intermediates. *Revista de ingeniería química*, **353**, 626–634
94. Yang Y, Lu X, Jiang J, Ma J, Liu G, Cao Y, Liu W, Li J, Pang S, Kong X, Luo C. (2017) Degradation of sulfamethoxazole by UV, UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> and UV/persulfate (PDS): Formation of oxidation products and effect of bicarbonate. *Water Res.* **1**(118), 196-207.
95. Yu, Linlong; Iranmanesh, Sobhan; Keir, Ian; Achari, Gopal. 2020. "A Field Pilot Study on Treating Groundwater Contaminated with Sulfolane Using UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>" *Water* **12**(4), 1200
96. Yuan F, Hu C, Hu X, Wei D, Chen Y, Qu J. (2011) Photodegradation and toxicity changes of antibiotics in UV and UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> process. *J Hazard Mater.* **185**(2-3),1256-63.
97. Zhang, R., Yang, Y., Huang, C.-H., Zhao, L., y Sun, P. (2016). Kinetics and modeling of sulfonamide antibiotic degradation in wastewater and human urine by UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> and UV/PDS. *Water Research*, **103**, 283–292.
98. Zhou, C., Gao, N., Deng, Y., Chu, W., Rong, W., y Zhou, S. (2012). Factors affecting ultraviolet irradiation/hydrogen peroxide (UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) degradation of mixed N-nitrosamines in water. *Journal of Hazardous Materials*, 231-232, 43–48.
99. Zorzo, C. F., Inticher, J. J., Borba, F. H., Cabrera, L. C., Dugatto, J. S., Baroni, S., Bergamasco, R. (2021). Oxidative degradation and mineralization of the endocrine disrupting chemical bisphenol-A by an eco-friendly system based

on UV-solar/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> with reduction of genotoxicity and cytotoxicity levels.  
*Science of the Total Environment*, **770**

100. Zotesso J.; Janeiro V. y Tavares C. (2017). Treatment of hospital laundry wastewater by UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> process. *Environmental Science and Pollution Research*.