



**BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA**

---

---



**Instituto de Ciencias**

**Posgrado en Ciencias Ambientales**

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

**Tesis**

**Análisis del funcionamiento de la PTAR de Izúcar de Matamoros y propuesta preliminar del proceso Fenton como tratamiento terciario para disminuir la contaminación ambiental de sulfametoxazol**

**PRESENTA**

**I.Q. MARIEL CONTRERAS LINO**

Director de tesis

**Dr. EDUARDO TORRES RAMÍREZ**

Co directora

**Dra. CYNTHIA ROMERO GUIDO**

**Puebla, Pue.**

**2022**

## Contenido

---

<b>1. Introducción</b>	<b>4</b>
<b>2. Planteamiento del problema</b>	<b>5</b>
<b>3. Justificación</b>	<b>7</b>
<b>4. Objetivos</b>	<b>9</b>
4.1. Objetivo general	9
4.2. Objetivos particulares	9
<b>5. Preguntas de investigación</b>	<b>10</b>
<b>6. Marco referencial</b>	<b>11</b>
<b>6.1. Marco Teórico</b>	<b>11</b>
6.1.1. Contaminación del agua	11
6.1.2. Tratamiento de aguas residuales	13
6.1.3. Procesos avanzados de oxidación	15
6.1.4. Proceso Fenton	16
6.1.5. Contaminación por antibióticos	19
6.1.6. Antibióticos sulfonamidas	25
<b>7. Marco legal</b>	<b>28</b>
7.1. Estrategia Nacional de Acción contra la Resistencia a los Antimicrobianos	30
<b>8. Tipo de investigación</b>	<b>32</b>
<b>9. Metodología</b>	<b>33</b>
9.1. Metodología objetivo 1: Sitio de estudio Planta de tratamiento de aguas residuales Izúcar de Matamoros, Puebla	33
9.2. Metodología objetivo 2: Aspectos socioeconómicos	35
9.3. Metodología objetivo 3: Condiciones de reacción óptimas	35
9.4. Metodología objetivo 4: Simulación del Proceso Fenton	36
<b>10. Resultados</b>	<b>38</b>
10.1. Descripción de la Planta de tratamiento de aguas residuales	38
10.2. Condiciones ambientales, económicas y sociales para la implementación del Proceso Fenton	42
10.3. Condiciones de operación del proceso Fenton para la eliminación de antibióticos	52
10.4. Simulación del proceso Fenton en el software ASPEN- HYSYS	55
<b>11. Discusión</b>	<b>61</b>
<b>12. Conclusiones</b>	<b>65</b>
<b>13. Bibliografía</b>	<b>66</b>

## Índice Tablas

Tabla 1. Procesos de oxidación Fenton. Elaborada con base en Rodríguez y Barrera, 2020; Xu, y col., 2019. ....	18
Tabla 2. Aplicaciones del proceso Fenton. Elaboración propia.....	19
Tabla 3. Antibióticos detectados como contaminantes alrededor del mundo .....	23
Tabla 4. Presencia de sulfonamidas en compartimientos ambientales y biológicos .....	26
Tabla 5. Marco legal asociado al proyecto .....	28
Tabla 6. Parámetros del efluente PTAR. Realizada con base en Herrera (2016) y García (2019). ....	40
Tabla 7. Caracterización del agua 2019, 2020. Elaboración propia .....	40
Tabla 8. Análisis microbiológico marzo 2020. Elaboración propia.....	41
Tabla 9. Condiciones de reacción del Proceso Fenton a escala piloto aplicado a efluentes reales para degradar micro contaminantes químicos y biológicos. ....	54
Tabla 10. Compuestos utilizados en la simulación y el modelo termodinámico empleado..	56
Tabla 12. Parámetros corrientes de salida de la simulación Fenton de degradación del sulfametoxazol. Elaboración propia.....	57

## Índice Figuras

Figura 1. Ejemplo de integración de tren de tratamiento .....	14
Figura 2. Ecuación general de la reacción Fenton .....	16
Figura 3. Representación esquemática de las fuentes y distribución de los antibióticos como contaminantes.....	22
Figura 4. Mapa del Estado de Puebla.....	33
Figura 5. Mapa de ubicación de la PTAR. ....	33
Figura 6. Diagrama de bloques para la propuesta del Proceso Fenton .....	36
Figura 7. Diagrama PTAR.....	38
Figura 8. Mapa de uso de suelos Izúcar de Matamoros, Puebla.....	45
Figura 9. Diagrama del flujo del Proceso Fenton como propuesta para el tratamiento de aguas residuales.....	56
Figura 10. Cinética Cinética de reacción calculada a partir de la constante de degradación del sulfametoxazol $0.92 \times 10^{-2} \text{ M}^{-1}\text{min}^{-1}$ . Elaboración propia.....	59
Figura 11. Cambios en la velocidad de degradación del sulfametoxazol calculados a partir de la constante de reacción $0.92 \times 10^{-2} \text{ M}^{-1}\text{min}^{-1}$ . Elaboración propia .....	59
Figura 12. Gráfico de Levenspiel para la degradación del 90% del sulfametoxazol. Elaboración propia. El área bajo la curva indicada hasta la línea punteada representa el volumen del reactor para una conversión del 90%.....	60

## 1. Introducción

---

La resistencia a los antimicrobianos es considerada recientemente un problema de la magnitud del cambio climático provocado principalmente por el uso intensivo de los antibióticos. La falta de adecuadas políticas públicas y las prácticas humanas inadecuadas con respecto al uso de antibióticos han favorecido al desarrollo y la propagación de microorganismos resistentes en el medio ambiente, especialmente en el medio acuático. Las plantas de tratamiento de aguas residuales tienen un papel importante en esta problemática, debido a que actúan como fuente de propagación de microorganismos resistentes a antibióticos, por lo que su estudio se ha priorizado en los últimos años. Actualmente, una de las propuestas para mitigar el problema de la contaminación por antibióticos es el implemento de tecnologías sustentables que tengan el alcance de eliminar estos fármacos y garanticen una mejora en la calidad del agua. El proceso Fenton es un proceso de oxidación avanzada que se ha estudiado en los últimos años como una tecnología que funciona para disminuir la concentración de antibióticos en plantas de tratamiento de aguas residuales. Diversos estudios han reportado resultados exitosos cuando se ha implementado este proceso avanzado de oxidación. En el presente trabajo de tesis se analizó una planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) del estado de Puebla, desde una perspectiva cualitativa, estudiando los factores socioeconómicos, institucionales, ecológicos y tecnológicos involucrados en la potencial aplicación del Proceso Fenton dentro de esta PTAR. Los aspectos institucionales y socioeconómicos se documentaron a partir de información de diversas fuentes y de entrevistas con actores principales en el sistema de estudio, mientras que el desarrollo de la propuesta técnica del proceso se realizó bajo una simulación de procesos en el software Aspen HYSIYS, bajo condiciones seleccionadas para esta planta de tratamiento en particular.

## 2. Planteamiento del problema

---

La resistencia a los antimicrobianos es uno de los mayores desafíos que, en cuestión de salud enfrenta la humanidad en el siglo XXI. Según O'Neill (2016), se ha reportado que la resistencia a antimicrobianos a nivel mundial causa alrededor de 700 000 muertes anualmente, y se estima que para el año 2050 sean 10 millones de vidas y un total de 100 billones de dólares en producción económica los que estén en riesgo a causa del aumento de infecciones resistentes.

En respuesta a ello, la Organización Mundial de la Salud, desarrolló el Plan de Acción Mundial sobre la resistencia a los antimicrobianos, en el cual se establece un marco de intervenciones para estimular la prevención de infecciones resistentes, desacelerar la tasa en la que surge la resistencia y así reducir la propagación de microorganismos resistentes (OMS, 2016).

En el año 2018, México publicó la Estrategia Nacional de Acción contra la Resistencia a los Antimicrobianos, cuya misión es propiciar el trabajo de colaboración intersecretarial, con el fin de que en el país se haga un uso racional de antimicrobianos para la salud humana, animal y en los cultivos, con el objetivo de reducir la diseminación de la resistencia a los antimicrobianos (RAM) en los diferentes sectores de salud pública, agricultura y medio ambiente (DOF, 2018). Dicha estrategia considera las medidas de tratamiento de agua residual como un elemento importante en la mitigación del problema.

Se ha reportado que las plantas de tratamiento son un sistema que funciona como fuente para el desarrollo de la RAM, debido a las condiciones fisicoquímicas y biológicas en las que operan (Novo, y col., 2013). Las plantas de tratamiento son uno de los depósitos más importantes de bacterias resistentes debido a la abundancia de fuentes de carbono y otros nutrientes, metales, biocidas, así como micro contaminantes del tipo antibióticos que, en conjunto, favorecen el crecimiento y aparición de estas bacterias (Manaia, y col., 2018).

Este trabajo aborda de manera cualitativa el funcionamiento de una PTAR, y propone de manera preliminar una intervención tecnológica sustentable para mitigar

el problema de la contaminación por antibióticos sulfonamidas como modelo de estudio. En este proyecto se ha seleccionado como sistema de estudio la PTAR ubicada en el municipio de Izúcar de Matamoros en el estado de Puebla. Esta PTAR presenta algunas dificultades técnicas e institucionales que no permiten su funcionamiento eficiente. La falta de políticas públicas adecuadas y algunos factores culturales han sido elementos determinantes que han magnificado la contaminación por antibióticos en México, por lo que es de suma importancia conocer la dinámica social en la localidad para entender qué acciones pueden propiciar que se exijan políticas públicas pertinentes, que garanticen una mejora en la calidad del agua y así poder incrementar la calidad de vida de la población. Para este trabajo se realizó un análisis cualitativo de los factores sociales, ecológicos y tecnológicos, a través de la revisión de las políticas públicas que han influido en la problemática ambiental sobre antibióticos en este sistema de estudio en particular, así como un análisis preliminar sobre una propuesta de un proceso Fenton para eliminar antibióticos como contaminantes emergentes modelo.

### 3. Justificación

---

Las plantas de tratamiento cumplen una función importante protegiendo los recursos hídricos y garantizando la salud pública, por esta razón es necesario implementar tecnologías que mejoren su desempeño sobre todo para transformar a los nuevos contaminantes que se incrementan día a día. Se estima que, del total de aguas tratadas, aproximadamente el 70% se destina para actividades agrícolas (CONAGUA, 2018), lo que nos lleva a reflexionar acerca de todos los riesgos a la salud y al medio ambiente que están asociados a su reutilización. Los antibióticos son considerados como micro contaminantes principales en las aguas residuales dado que promueven principalmente la generación de bacterias resistentes y representan una amenaza para la salud humana (Makowska, y col., 2016).

La PTAR seleccionada como sistema de estudio tiene como tratamiento principal los lodos activados; sin embargo, existe información que señala que la PTAR opera de manera intermitente, aunado a eso, se considera una PTAR no actualizada tecnológicamente debido a la carencia de procesos terciarios para la eliminación correcta de compuestos químicos y biológicos recalcitrantes.

Al tratarse de una problemática ambiental compleja, este trabajo permite documentar información sobre los factores que están relacionados con la presencia de antibióticos en el agua de la zona de estudio. Con ello, se identificaron las acciones existentes en la zona de estudio que han sido recomendadas en la Estrategia Nacional contra la resistencia a los antimicrobianos (DOF, 2018). Se propone de manera preliminar el análisis de la pertinencia del proceso Fenton para eliminar antibióticos como tecnología de actualización. En los últimos años, el proceso Fenton ha sido fuertemente estudiado para ser aplicado para la degradación de distintos contaminantes con resultados prometedores.

La eventual implementación de tecnologías eficientes en las plantas de tratamiento sería benéfica para la salud de las poblaciones ya que disminuiría la contaminación por antibióticos y su impacto en la generación de bacterias resistentes. Para la simulación del proceso Fenton se ha elegido al sulfametoxazol

ya que representa un antibiótico ampliamente utilizado para la salud humana, y sobre todo para la salud animal; por lo que ha sido mayormente detectado en aguas superficiales, subterráneas, así como en efluentes de entrada y salida de las PTARs.

## **4. Objetivos**

---

### **4.1. Objetivo general**

Analizar el funcionamiento de la PTAR de Izúcar de Matamoros, así como proponer de manera preliminar un proceso Fenton para la eliminación de antibióticos sulfonamidas.

### **4.2. Objetivos particulares**

1. Describir el estado actual del funcionamiento de la planta de tratamiento.
2. Determinar las condiciones ambientales, económicas e institucionales alrededor de la PTAR.
3. Documentar e identificar las mejores condiciones de operación del proceso Fenton para la eliminación de antibióticos sulfonamidas.
4. Desarrollar una simulación ingenieril de una propuesta preliminar de proceso Fenton en la PTAR en estudio.

## **5. Preguntas de investigación**

---

1. ¿Cuáles son los factores socio-ecológicos que explican el funcionamiento actual de la PTAR en estudio?
2. ¿Cuáles son las condiciones que favorecen la presencia de antibióticos en la PTAR?
3. ¿Qué requisitos mínimos son necesarios para implementar un proceso Fenton en la PTAR en estudio?

## 6. Marco referencial

---

### 6.1. Marco Teórico

#### 6.1.1. Contaminación del agua

El 71% de la superficie de la Tierra está cubierta por agua. El agua es un líquido vital, sin el cual la vida no sería posible. El agua potable se ha establecido como un derecho fundamental para todos los seres humanos, sin importar raza, religión, sexo, nacionalidad u otra condición (FEA, 2019). El agua cumple varias funciones tanto en los ecosistemas como en la sociedad, pues es un factor clave para combatir la pobreza, mejorar la salud de las personas, proveer alimento y para el desarrollo económico (UNESCO ETXEA, 2016).

El agua es imprescindible para la vida, pero contaminada, representa un peligro para la salud (Boelee, *et al*, 2019). Del total del agua disponible en México, el 75% se destina a la agricultura industrial y, de acuerdo con los reportes, se desperdicia cerca del 51% del recurso (FEA, 2006); del uso restante del agua en la sociedad, el 5.55% se utiliza para producir energía eléctrica (hidroelectricidad), el 4.09% se utiliza para abastecer a las industrias y el 14.65% se usa para el abastecimiento público (CONAGUA, 2018). La intensa actividad industrial ha provocado que la contaminación del agua se convierta en uno de los principales problemas de salud ambiental.

La solución de la contaminación del agua no solo requiere de inversión económica, sino de una adecuada legislación sumada a la colaboración de instituciones y de la sociedad para fortalecer la gestión del agua; aunque la problemática del agua se ha centrado en las necesidades del humano, es de suma importancia señalar su importancia para la conservación de los ecosistemas y su biodiversidad (SEMARNAT, 2008).

Las plantas de tratamiento de aguas residuales desempeñan un papel fundamental en la protección de los cuerpos de agua naturales y a su vez tienen la función de garantizar agua de buena calidad para los asentamientos humanos, recordemos que sin calidad de agua no hay calidad de vida. Las plantas de

tratamiento son diseñadas, principalmente, para eliminar materia orgánica, sedimentos y microorganismos dañinos para la salud humana; sin embargo, el crecimiento poblacional, los estilos de vida actuales y el desarrollo socioeconómico desregulado han creado nuevos retos para la gestión integral de las aguas residuales (Manaia, y col.,2018).

Investigaciones recientes afirman que la falta de actualización en la infraestructura en plantas de tratamiento de agua residual ha favorecido la dispersión en el ambiente de microcontaminantes como los antibióticos (Makowska, y col.,2016).

De acuerdo con Manaia y col. (2018), cada planta de tratamiento es un sistema único y la manera en cómo se desempeñan, tecnológica y biológicamente, puede variar importantemente ente ellas. Combatir la diseminación de los microcontaminantes como antibióticos en el medio ambiente implica contar con estrategias a largo plazo que puedan evaluar realmente el problema, así como estudiar todos los factores que intervienen para poder comprender las deficiencias, y la eventual actualización de las tecnologías de tratamiento (Barancheshme y Munir, 2018). Una de las estrategias propuestas es la de monitorear las plantas de tratamiento e implementar procesos terciarios o post tratamientos con la finalidad de elevar la calidad del agua (Manaia, y col., 2018).

En México, se estima que el volumen de aguas residuales generado es de 6.7 miles de millones de metros cúbicos, y se calcula que para el año 2030 aumente a 9.7 miles de millones de metros cúbicos; lo más preocupante es que, de estas aguas, solo el 38% recibe un tratamiento (CONAGUA, 2012). El país cuenta con 2526 plantas de tratamiento de aguas residuales municipales y 3025 plantas industriales en operación, de las cuales, el 52.90% trabaja opera con un sistema de lodos activados, que es un proceso secundario, el 3.88% ocupa filtros biológicos, el 5.22% lagunas aireadas, el 17.19% dual, entre otros (CONAGUA, 2018). Estos datos hacen evidente la necesidad de fortalecer el trabajo de las plantas de tratamiento con recursos económicos y con la mejoría de las capacidades técnicas que se requieren para un óptimo funcionamiento (Martínez-Austria, 2013).

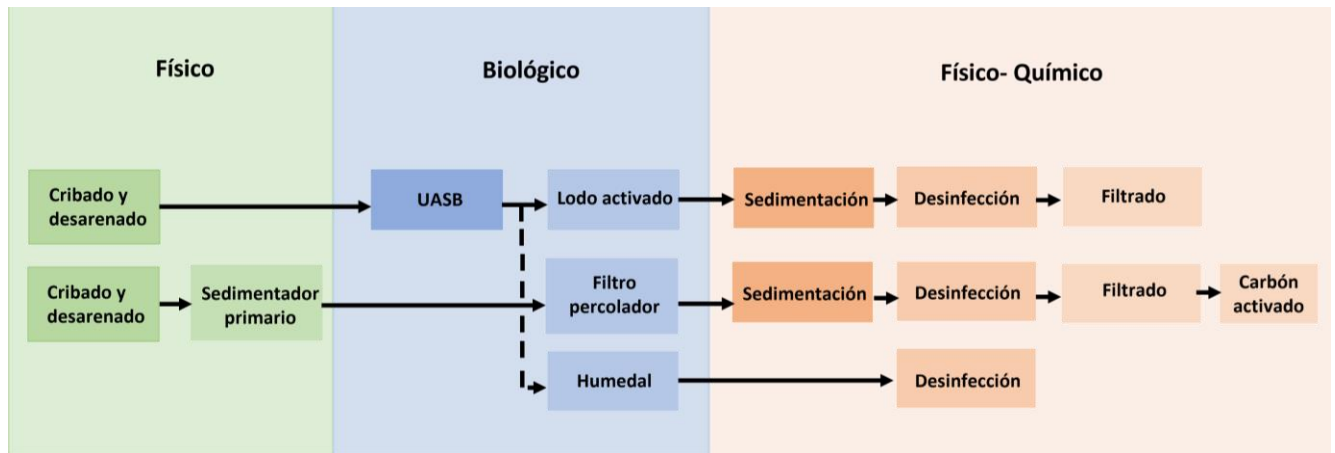
La normatividad que regula el funcionamiento de las plantas de tratamiento de agua en México está descrita en la NOM-001-SEMARNAT-2022, que regula los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales; la NOM-002-SEMARNAT-1996, que regula los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal; y la NOM-004-SEMARNAT-1997, que regula los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reúsen en servicios al público. De lo anterior podemos decir que, aunque existen normativas que regulan la cantidad de sustancias que se vierten a los cuerpos naturales, no hay normativas que regulen la cantidad de microcontaminantes que se vierten; en particular no hay normativas en plantas de tratamiento que regulen la cantidad de antibióticos. Adicionalmente, el problema de la falta de programas de mantenimiento y capacitación de los operarios, disminuyen la capacidad instalada de tratamiento. Como puede concluirse, a nivel de infraestructura y normatividad existen limitantes importantes en el país para la gestión integral del agua residual.

#### 6.1.2. Tratamiento de aguas residuales

El tratamiento de las aguas residuales ha tenido un gran impacto en el desarrollo de la sociedad. En países como México, se ha pospuesto el uso de tratamientos de aguas residuales que integren criterios sustentables para minimizar el impacto de los efluentes y asegurar la salud de los ecosistemas. Para lograr lo anterior debe realizarse una selección adecuada de las tecnologías que se aplicarán a los sistemas de tratamiento de aguas residuales (Noyola, *y col.*, 2013; Ben, *y col.*, 2017).

El tratamiento de aguas residuales se refiere a todas las operaciones físicas, químicas y biológicas que intervienen en la eliminación de los contaminantes existentes en los influentes, con la finalidad de que el agua antes de ser vertida cumpla con las normativas correspondientes (Salas, *et. al.*, 2007).

Existe una diversa gama de operaciones y procesos unitarios para el tratamiento de aguas residuales. Los elementos de tratamiento se clasifican en operaciones físicas unitarias, procesos químicos o biológicos unitarios. Estas operaciones, y procesos unitarios se combinan para dar lugar a un tren de tratamiento. En la Figura 1 se muestra un ejemplo de ello (Noyola, y col., 2013).



**Figura 1.** Ejemplo de integración de tren de tratamiento

Fuente: Con base en Noyola, y col., 2013.

Dependiendo del uso que se le dará al agua saliente, se deben aplicar distintos niveles de tratamiento, acordes al estado del agua a tratar; los niveles de tratamiento existentes se describen a continuación:

- **Tratamiento preliminar:** En este tratamiento se eliminan aquellos elementos gruesos que generalmente flotan, son visibles y que puedan provocar problemas de operación y de mantenimiento (Bermeo, 2016). Un ejemplo es la eliminación de componentes de gran volumen como ramas, piedras, plásticos, arenas, grasas y aceites. Para los sólidos gruesos por lo general se emplea el cribado, así como la sedimentación de arenas y sólidos densos en unos equipos llamados desarenadores, se pueden emplear también desgrasadores (Noyola, y col., 2013).
- **Tratamiento primario:** En este nivel, una parte de sólidos y materia orgánica suspendida es retirada del agua residual utilizando la fuerza de gravedad como principio. En aguas residuales los números de remoción

alcanzados son aproximadamente del 60% en sólidos suspendidos y de 35-40% en la DBO. Esto se lleva a cabo regularmente por procesos fisicoquímicos como sedimentación y coagulación floculación, aquí se prepara el agua para el siguiente nivel (Noyola, y *col.*, 2013; Bermeo, 2016).

- **Tratamiento secundario:** En este nivel se elimina la materia orgánica biodegradable (principalmente soluble), puede ser por tratamientos biológicos, donde se emplean colonias de microorganismos para degradar la materia orgánica (Bermeo, 2016). Estos se dividen en procesos aerobios y anaerobios. Dentro de los aerobios se pueden identificar 5 procesos principales como los lodos activados, los sistemas de lagunas de estabilización, el filtro percolador, el filtro sumergido y el disco biológico. Los procesos anaerobios no emplean como fuente de electrones al oxígeno, por lo que no requieren aireación. Otro de los objetivos principales es reducir la cantidad de ciertos nutrientes como el nitrógeno y el fósforo, por lo que es común que también se empleen los sistemas combinados (Noyola, y *col.*, 2013).

- **Tratamiento terciario o avanzado:** Se refiere a los tratamientos hechos después del tratamiento secundario con la finalidad de eliminar compuestos suspendidos, materia orgánica no biodegradable (contaminantes emergentes y persistentes) así como microorganismos patógenos (bacterias resistentes ante ellos). Los tratamientos terciarios son muy necesarios cuando se debe cumplir con condiciones de descarga estrictas o cuando el agua es para algún uso específico (Noyola, y *col.*, 2013).

Ejemplos de este tipo de tratamiento son los procesos avanzados de oxidación que se describen a continuación.

### 6.1.3. Procesos avanzados de oxidación

Con la aparición de nuevos contaminantes se han presentado grandes desafíos para su eliminación. Para garantizar una mejor calidad del agua, es

necesario contar con tratamientos avanzados que sean eficientes en la eliminación de los contaminantes. Los procesos avanzados de oxidación (PAO's) son métodos eficientes e innovadores que han sido fuertemente estudiados en los últimos años para el tratamiento de aguas residuales (Barliza y Torres, 2018). Estos procesos se caracterizan porque utilizan especies altamente reactivas, como el radical hidroxilo ( $\text{OH}^\bullet$ ), para oxidar una amplia gama de contaminantes orgánicos (Zhang, y col., 2016; Kumar y Pal, 2018). Adicionalmente estos procesos han sido propuestos para la disminución de la contaminación microbiológica (Belles, 2018).

Los PAO's se dividen en dos categorías, los fotoquímicos y los no fotoquímicos. Los primeros utilizan fuentes de luz solar o ultravioleta para producir los  $\text{OH}^\bullet$  (Terán, 2016); por su parte, los PAO's no fotoquímicos utilizan reductores químicos que permiten realizar transformaciones en contaminantes tóxicos poco susceptibles a la oxidación, como iones metálicos o compuestos halogenados (Forero, y col., 2005). Los más comunes son los sistemas basados en ozono ( $\text{O}_3$ ), la electroquímica, y los procesos Fenton (Belles, 2018).

#### 6.1.4. Proceso Fenton

El proceso Fenton es un proceso avanzado de oxidación que ha demostrado ser capaz de eliminar contaminantes refractarios y tóxicos en aguas residuales. Consiste en la adición de sales de hierro en presencia de  $\text{H}_2\text{O}_2$  en condiciones ácidas, para la formación de radicales hidroxilos. La combinación entre  $\text{H}_2\text{O}_2$  y sales de hierro, usualmente sulfato ferroso, se denomina reactivo Fenton (Clemente, y col., 2014). El radical hidroxilo tiene una fuerte capacidad de oxidación y se ha comprobado que en algunos casos se alcanza la mineralización completa de los contaminantes (Xu, y col., 2019).

La reacción general que se lleva a cabo en el proceso Fenton es la siguiente:



**Figura 2.** Ecuación general de la reacción Fenton

**Fuente:** Belles, 2018.

El proceso Fenton fue desarrollado en el año de 1894 por Henry J. Fenton cuando descubrió que el peróxido de hidrógeno ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) podía activarse con iones ferrosos para oxidar ácido tartárico (Belles, 2018). Los procesos Fenton han sido empleados para degradar materia orgánica, reducir la demanda química de oxígeno (DQO), reducir la toxicidad, aumentar su biodegradabilidad, etc. (Terán, 2016).

Existen parámetros que intervienen en la eficiencia de la reacción Fenton, estos se describen a continuación:

- Dosis de  $\text{H}_2\text{O}_2/\text{Fe}^{2+}$

Se ha reportado que aumentar la concentración de ambos reactivos, genera una mayor producción de radicales  $\text{HO}\cdot$ , no obstante, un exceso en las dosis de ambos reactivos puede convertirse en un alza de la demanda química de oxígeno (DQO), lo que disminuye la eficiencia de la reacción (Rodríguez y Barrera, 2020).

- Temperatura

De acuerdo con datos reportados, la temperatura puede aumentar la reacción entre el catalizador y el agente oxidante ( $\text{H}_2\text{O}_2/\text{Fe}^{2+}$ ) produciendo  $\text{HO}\cdot$  adicionales, el incremento de la temperatura mejora la eliminación de materia orgánica, pero puede dar lugar a la descomposición del  $\text{H}_2\text{O}_2$  en agua y oxígeno y la generación de  $\text{Fe}(\text{OH})_3$ , lo que disminuye la remoción de DQO (Sánchez, 2015).

- pH

El pH es el factor que tiene mayor efecto en el rendimiento de la reacción Fenton (Babuponnusami y Muthukumar, 2013), los pH ácidos favorecen el desempeño de la reacción, siendo de 2.5 a 3 los valores óptimos. Se ha reportado que a valores elevados de pH se forman complejos de hierro, disminuyendo la eficiencia del proceso

Los procesos Fenton y Foto-Fenton son muy utilizados en el campo de la industria debido a su poder de oxidación, al bajo costo de los reactivos y a su facilidad de operación (Rodríguez y Barrera, 2020).

Diferentes innovaciones se han desarrollado dirigidas al mejoramiento de la tecnología Fenton. En la tabla 1 se muestran algunas de ellas.

Tabla 1. Procesos de oxidación Fenton. Elaborada con base en Rodríguez y Barrera, 2020; Xu, y col., 2019.			
Proceso	Mecanismo	Ventajas	Desventajas
<b>Foto Fenton</b>	<p>Una combinación de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> y radiación UV con ión oxalato y Fe<sup>2+</sup> O Fe<sup>3+</sup></p> <p>Reacción:  <math display="block">\text{Fe}(\text{OH})^{2+} + h\nu \rightarrow \text{Fe}^{2+} + \text{OH}</math></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Producción de más OH</li> <li>-Mejor degradación de contaminantes</li> <li>-Se pueden utilizar ligandos orgánicos lo que permite extender rango de pH</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Baja utilización de la luz visible</li> <li>- Energía UV requerida por mucho tiempo</li> <li>- Alto consumo de energía y costo</li> </ul>
<b>Electro Fenton</b>	<p>Se genera H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> <i>in situ</i> a través de reducción de dos electrones de oxígeno disuelto en la superficie de un cátodo en una solución ácida</p> <p>Reacción: <math>\text{O}_2 + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2\text{O}_2</math></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Generación de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> <i>in situ</i> a través de un proceso electroquímico</li> <li>-Disminución en costo</li> <li>-Disminución de lodos de hierro (se regenera el ión ferroso)</li> </ul>	<p>-La eficiencia del proceso depende de la naturaleza del electrodo, del pH, temperatura, concentración del catalizador, nivel de oxígeno disuelto y la densidad de corriente.</p>
<b>Sono-Fenton</b>	<p>Se utiliza ultrasonido en el tratamiento. El ultrasonido se deriva de la cavitación dentro de la irradiación ultrasónica</p> <p>Reacción: Fe<sup>2+</sup>-OOH<sub>2</sub> se descompone a Fe<sup>2+</sup> y •OOH</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Se promueve el ciclo redox Fe<sup>3+</sup>/Fe<sup>2+</sup></li> <li>-El ultrasonido proporciona efectos de transferencia de masa y agitación para promover la difusión de los reactivos</li> <li>-Mejora en la eficiencia de la reacción</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Alto costo</li> <li>Uso intensivo de energía</li> <li>Su aplicación práctica es limitada.</li> </ul>

Algunas de las aplicaciones del proceso Fenton reportadas y los resultados obtenidos se muestran en la tabla 2. Como puede observarse, el proceso Fenton es versátil y puede aplicarse en diversas ramas como tratamiento de aguas residuales industriales y hospitalarias, en donde se ha reportado la degradación de materia orgánica, compuestos orgánicos persistentes, diversos fármacos como antibióticos,

y también ha sido probado para degradar bacterias resistentes a antibióticos con eficiencias de remoción por encima de otros métodos avanzados de oxidación.

**Tabla 2.** Aplicaciones del proceso Fenton. Elaboración propia

Aplicación	Desempeño
<b>Proceso Fenton en efluentes industriales</b>	Eliminación de HAP (hidrocarburos aromáticos policíclicos) en un 97% (Clemente, y col., 2014) Fenton heterogéneo: disminución de DQO, proceso sustentable (Bernatené, y col., 2015).
<b>Procesos Fenton y Foto-Fenton en aguas residuales hospitalarias</b>	Degradación de paracetamol, disminución del DQO (Belles, 2018). Disminución del 70% de DQO (Muñoz, y col., 2014)
<b>Procesos Fenton en aguas residuales con bacterias resistentes a antibióticos</b>	Inactivación de 11 bacterias resistentes y genes de resistencia a antibióticos mediante Fenton Solar (Giannakis, y col., 2018) Inactivación de bacterias y genes de resistencia a antibióticos (Ahmed, y col., 2020). Reducción de genes de resistencias por Fenton y foto-Fenton (sul1, tetX y tetG) (Zhang, y col., 2016). Inactivación de coliformes <i>E. coli</i> por electro-Fenton (Wang, y col., 2020).
<b>Proceso Fenton y Foto Fenton solar en aguas textiles simuladas</b>	Degradación de colorantes textiles en agua residual, reducción de DOC (Doumic, 2015)
<b>Proceso Fenton en aguas residuales</b>	Degradación de contaminantes orgánicos como Fenol y clorobenceno (Babuponnusami y Muthukumar, 2013)

#### 6.1.5. Contaminación por antibióticos

El crecimiento poblacional en conjunto con las necesidades humanas ha propiciado el aumento en la producción y consumo de fármacos, dentro de los cuales, los antimicrobianos son de los más utilizados. Un antimicrobiano es una sustancia natural o sintética que es capaz de eliminar o inhibir el crecimiento de microorganismos bacterias, protozoos y hongos, e incluso agentes infecciosos como los virus. Los antibióticos son un tipo de antimicrobiano con la capacidad de eliminar bacterias (PNUMA, 2017). Los antibióticos constituyen un amplio y heterogéneo grupo de medicamentos clasificados por su mecanismo de acción los

cuales abarcan aquellos que inhiben la síntesis de la pared o membrana bacteriana, la síntesis proteica, la síntesis de ácidos nucleicos o aquellos que interfieren en las vías metabólicas de las bacterias. Los antibióticos son la tercera clase de medicamentos más vendidos a nivel mundial, con un mercado anual entre \$7 millones y \$22 mil millones de dólares; sin embargo, las estimaciones actuales sugieren que de este gasto alrededor de \$4 mil millones a \$5 mil millones son resultado del pago extra que generan las bacterias resistentes a los antibióticos. Entre 2000 y 2010, el consumo de medicamentos antibióticos aumentó un 36% (de 54 mil millones unidades estándar a 73 mil millones de unidades estándar). Brasil, Rusia, India, China y Sudáfrica representaron el 76% de este aumento (Van Boeckel, y col., 2014).

Del volumen total de antibióticos consumidos mundialmente, se calcula que del 50 al 75%, son utilizados en la medicina veterinaria y la ganadería. En Estados Unidos se comercializan cerca de 14,400 toneladas de antibióticos al año (Steinfeld y col., 2009); a nivel mundial el consumo de antibióticos en el ganado alcanzó las 63,151 toneladas en 2010 y se prevé un aumento del 67% para 2030 (Ibrahim, y col., 2019). La Organización Mundial de la Salud (OMS) clasifica las fluoroquinolonas las cefalosporinas de tercera y cuarta generación, los macrólidos, los glucopéptidos y las polimixinas como antibióticos de "máxima prioridad e importancia crítica" para medicina humana. La penicilina, los macrólidos y las fluoroquinolonas son los más utilizados en humanos, mientras que las tetraciclinas, la penicilina y las sulfonamidas son los fármacos más utilizados en animales (Ma, y col., 2021).

Entre los países de Latinoamérica, México fue, entre 1997 y 2004, el país líder en uso clínico de antibióticos, con unas 14-16 dosis diarias definidas por cada 1000 habitantes al día (DDD/TID); para 2007, México bajó al cuarto lugar, con 13.26 DDD/TID, por debajo de Argentina, Venezuela y Perú. La prescripción de antibióticos está muy extendida en México e incluye la utilización de 12 grupos farmacológicos. Los antibióticos más prescritos son las quinolonas, seguidas de penicilinas, cefalosporinas, macrólidos, lincosamidas y sulfonamidas (Sánchez, y

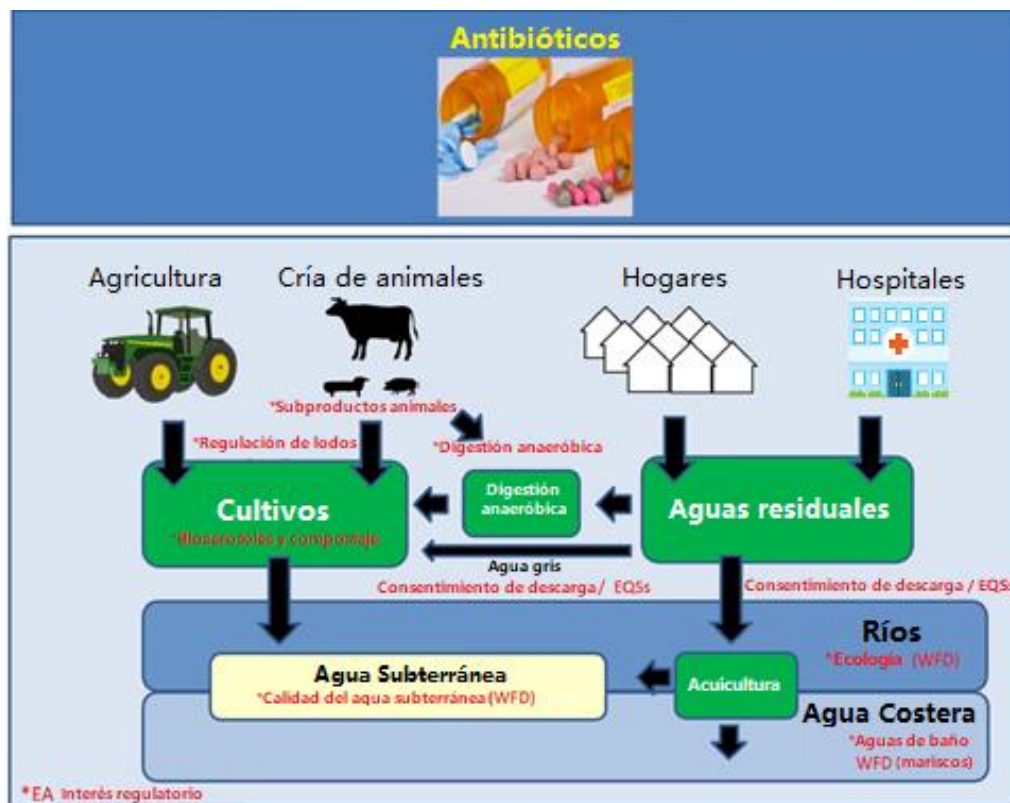
col., 2015). En nuestro país, sus ventas representan un mercado anual de 960 millones de dólares (Dreser, y col., 2008).

Respecto a la contaminación provocada por antibióticos, las fuentes y distribución en el ambiente se describen a continuación. Las fuentes de antibióticos como contaminantes son la agroindustria, el drenaje domiciliario, los hospitales y la industria química de síntesis (Figura 3) (Singer, y col., 2016). En el caso de la agroindustria, los antibióticos son utilizados no solo para el tratamiento de las infecciones, sino también para prevención (antes de que la infección suceda) y como promotor de crecimiento. Sin embargo, hasta el 90% de la ingesta de antibióticos se excreta en la orina y el estiércol porque los antibióticos se absorben mal en el intestino (Vives, y col., 2004), contaminando agua y suelo cercano. Adicionalmente, estas sustancias se liberan en el entorno agrícola mediante la aplicación directa de estiércol orgánico para la fertilización del suelo. Así, la aplicación extensiva de antibióticos veterinarios ha dado lugar a la detección frecuente y ubicua de antibióticos en el medio ambiente. Posteriormente, estos contaminantes se acumulan en el suelo y afectan a los microorganismos y plantas (Cheong, y col., 2020).

Por otro lado, la contaminación por antibióticos desde la industria de síntesis es debida a un inadecuado o carente tratamiento de los efluentes líquidos de estas fuentes, lo que incorpora directamente estos compuestos al drenaje municipal y posteriormente a las aguas superficiales. Este mismo caso sucede para los efluentes de los hospitales y domicilios, con la salvedad de que los antibióticos son desechados al drenaje por las personas bajo tratamiento médico dado que, de manera similar a los animales, el cuerpo humano solo absorbe un porcentaje del antibiótico suministrado. Un porcentaje no cuantificado de la contaminación es debido a la mala disposición final de los antibióticos caducos.

Sólo una parte del drenaje municipal o industrial llega a las plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) para su purificación (alrededor del 40% en México); por lo que la mayoría de los efluentes contaminados por antibióticos son incorporados a los ríos de manera directa. Cuando estos efluentes son llevados a

las PTAR solo un porcentaje de los antibióticos son eliminados. Algunos de los antibióticos resultan ser resistentes a los procesos metabólicos en un reactor biológico o a los procesos fisicoquímicos implementados; de manera que diversos antibióticos han sido detectados a la salida de las PTAR. Posteriormente, los antibióticos son reincorporados a las corrientes de agua, en donde estas son utilizadas con diferentes fines como el riego de cultivos, la producción de agua potable, o solo reincorporadas a los cuerpos de agua. En los tres casos los antibióticos tienen un impacto ambiental que debe estudiarse, cuantificarse y remediarse (Singer, y col., 2016).



**Figura 3.** Representación esquemática de las fuentes y distribución de los antibióticos como contaminantes con base en Singer y col, 2016.

Diferentes estudios han reportado la presencia de antibióticos en diversos compartimientos ambientales; pero el agua es el principal sumidero. En la tabla 3 se resumen dichos estudios.

<b>Tabla 3. Antibióticos detectados como contaminantes alrededor del mundo</b>			
<b>Antibióticos</b>	<b>Lugar/ zona</b>	<b>Sitios</b>	<b>Referencia</b>
<b>Sulfonamidas, cloranfenicol, tetraciclina, sulfaclopiridazina</b>	India	Aguas residuales	Shejale, y col., 2020
<b>Ampicilina</b>	Ambientes acuáticos de varios países	Efluentes de hospitales	Castro, y col., 2015
<b>Eritromicina</b>		Aguas residuales	
		Agua superficial	
<b>Claritromicina</b>		Agua subterránea	
		Aguas residuales	
		Agua superficial	
<b>Ciprofloxacino</b>		Agua subterránea	
		Efluentes de hospitales	
		Aguas residuales	
		Agua superficial	
<b>Sulfametoxazol</b>		Aguas residuales	
		Agua superficial	
		Agua subterránea	
<b>Trimetoprima</b>	Aguas residuales		
	Agua superficial		
<b>Cefalosporinas: cefradina, cefuroxima, ceftriaxona, cefepima</b>	Xuanwu, China	Sedimentos de lago	
<b>Sulfametoxazol</b>	México	PTARs	
<b>Azitromicina</b>	Estados Unidos	PTARs	Zaied, y col., 2020
<b>Metronidazola</b>			
<b>Sulfametoxazol</b>			
<b>Trimetoprima</b>			
<b>Sulfadimetoxina</b>	Estados Unidos	Raíz de cebada	Ahmed, y col., 2015
		Hojas de cebada	

<b>Sulfonamidas: sulfadiazina, sulfapiridina, sulfamerazina, sulfametazina y sulfametoxazol</b>	China	Aguas residuales	Wang, y col., 2021
<b>Continuación Tabla 3.</b>			
<b>Antibióticos</b>	Lugar/ zona	Sitios	Referencia
<b>Sulfonamidas: sulfadiazina, sulfamerazina, sulfametazina, sulfametoxazol</b>	China	Aguas residuales	Ling, y col., 2022
<b>Sulfametoxazol</b>	Polonia	Aguas municipales, agricultura y ganadería	Kokoszka, y col., 2021
<b>Sulfapiridina</b>			
<b>Sulfadiazina</b>			
<b>Sulfonamidas</b>	China	Estiércol de ganado y aves de corral	Zheng, y col., 2021

Las concentraciones reportadas son por lo general muy bajas, en el orden de ng/L o µg/litro. Sin embargo, ese nivel de concentración es suficiente para producir un impacto ambiental como promotores de la resistencia bacteriana. La resistencia bacteriana es la capacidad de adaptación de las bacterias ante los antibióticos (OMS, 2017). Esta resistencia ha sido promovida por diversas actividades humanas, entre los que destacan su uso intensivo, inadecuado e indiscriminado, así como la falta de normas y fiscalización sobre su comercialización, uso y disposición final (Collignon, y col., 2015). Recientemente, diversas bacterias patógenas han presentado resistencia a uno, varios o la mayoría de los antibióticos (OMS, 2020), lo que supone una amenaza creciente para la salud pública mundial; algunos ejemplos son: *Acinetobacter*, *Pseudomonas*, *Klebsiella*, *Escherichia*, *Serratia*, y *Proteus* (Serra, 2017) (OMS, 2017). Ante esta problemática, se estima que en el mundo mueren alrededor de 700 000 personas a consecuencia de la resistencia bacteriana, y que para el 2040 las muertes llegarán hasta 10 millones de vidas al año (O'Neill J y col., 2016). Las bacterias resistentes no solo han sido identificadas

frecuentemente en hospitales sino también en los compartimientos ambientales, incluidos efluentes de entrada y salida de las PTARs, lagunas, ríos, suelo, cultivos, etc. (Bairán, y col., 2021).

#### 6.1.6. Antibióticos sulfonamidas

Las sulfonamidas fueron las primeras drogas empleadas para el tratamiento sistémico de infecciones bacterianas en el ser humano. Estos fármacos contienen un grupo sulfuro unido a un anillo de benceno y grupos  $\text{NH}_2$ . Las sulfonamidas en concentraciones terapéuticas bajas son bacteriostáticas porque interfieren con la transformación del ácido *p*-aminobenzoico (PABA), lo que impide la formación del ácido fólico, por lo que la bacteria no puede continuar sus procesos vitales y de reproducción (Calvo y Martínez, 2008). Las sulfonamidas se unen a la enzima dihidropteroato sintasa en el mismo sitio de reconocimiento al cual se une el PABA; por lo que, en presencia del antibiótico, la enzima es incapaz de catalizar la síntesis del ácido fólico; por lo que las bacterias son incapaces de sintetizar los ácidos nucleicos requeridos para su crecimiento.

En el sector salud, las sulfonamidas son prescritas para tratar infecciones del tracto urinario, infecciones oculares, colitis ulcerativa, artritis reumatoide, toxoplasmosis, etc. Esta amplia gama de aplicaciones hace a las sulfonamidas agentes sumamente utilizados también en el sector veterinario.

Las sulfonamidas están entre los antibióticos más utilizados en medicina humana y veterinaria. Se calcula que cada año se introducen más de 20.000 toneladas de ellas en la biosfera, y que entre el 50% y el 75% de estos antibióticos se utilizan en medicina veterinaria. La sulfamonometoxina (SMM), el sulfametoxazol (SMZ), la sulfametazina (SM2) y la sulfadiazina (SD) son los medicamentos veterinarios más utilizados (Gao, y col., 2019).

El uso intensivo y desregulado de las sulfonamidas las han convertido en microcontaminantes frecuentemente detectados en casi la totalidad de los compartimientos ambientales y las matrices biológicas debido a la gran movilidad

de estos antibióticos. El SMZ se incluyó entre los 11 compuestos más frecuentemente detectados en estudios realizados en Estados Unidos, China y Austria (Gao, y col., 2019). En la tabla 4 se resumen algunos reportes en los que se ha detectado a las sulfonamidas como microcontaminantes ambientales.

**Tabla 4.** Presencia de sulfonamidas en compartimientos ambientales y biológicos

Sulfonamida	Lugar	Sitio	Concentración	Referencia
<b>Sulfametoxazol</b>	China	Hojas de rábano	2.7 mg/kg	X. Hu y col., 2010
	España	Ríos (Jarma, Mazanares, Guadarrama, Henares, Tajo)	326 µg/L	R. López-Serna y col., 2013
	China	Mar Amarillo	0.10-16.6 ng/L	R. Zhang y col., 2013
	México	PTARs	0.31 ng/L	Castro, y col., 2015
	Estados Unidos	4 PTARs	152 mg/L, 80 mg/L, 590 mg/L, 1172 mg/L	Gao, y col., 2015
	Polonia	Aguas municipales, suelos de cultivo y estiércol	78.88 ng/L, 38.88 ng/L, 0.40 ng/L	Kokoszka, y col., 2021
	China	Agua subterránea	7-30 ng/L	Zuo, y col., 2021
<b>Sulfadimetoxina</b>	Estados Unidos	Raíz de cebada, Hojas de cebada	1.2 mg/g, 1.1 mg/g	Ahmed, y col., 2015
<b>Sulfapiridina</b>	Polonia	Aguas superficiales	38.88 ng/L	Kokoszka, y col., 2021
<b>Sulfadiazina</b>	Polonia	Aguas superficiales	0.40 ng/L	Kokoszka, y col., 2021

	China	Aguas superficiales	5.064 ng/L	Ye, y col., 2021
	China	Peces	1.42 ng/g de peso húmedo	Ye, y col., 2021

De igual manera, el impacto por la contaminación por sulfonamidas resulta en la proliferación de bacterias resistentes en los compartimientos ambientales (Baran, y col., 2011). Adicionalmente, Varios estudios han estimado la ecotoxicidad de las sulfonamidas. Por ejemplo, Ahmed y col. (2015) reportó de que en el suelo podrían afectar al crecimiento de las plantas (Ahmed, y col., 2015). Anna y col. (2011) demostró que las sulfonamidas pueden afectar gravemente a los organismos objetivo, como las algas verdes y las hierbas de los patos, en concentraciones elevadas desde el punto de vista medioambiental (Białk-Bielińska, y col., 2011).

#### 6.1.7 Simulación de procesos de tratamiento de agua residual

La simulación de procesos se utiliza para el diseño, desarrollo, análisis y optimización de procesos técnicos tales como: plantas químicas, procesos químicos, sistemas ambientales, centrales eléctricas, operaciones de fabricación complejas, procesos biológicos y funciones técnicas similares. Las técnicas de simulación sirven para analizar los procesos actuales (mejora y optimización) y procesos futuros (anticipación de soluciones) con el fin de obtener el diseño más eficiente con diferentes objetivos como optimización de recursos. validación de la inversión a realizar, entre otros. Una simulación sencilla se puede usar para probar la factibilidad técnica y económica del proyecto.

En cuanto a la herramienta de aprendizaje empleada, el software comercial Hysys, como en general todos los programas de simulación de procesos, permiten la reproducción económica de procesos costosos; facilitan la comprensión de operaciones en un entorno similar al real; simplifican los cálculos numéricos; permiten el desarrollo de aspectos más conceptuales; posibilitan la verificación cualitativa y cuantitativa de hipótesis. En los años recientes, ASPEN HYSYS ha sido utilizado para numerosos estudios en las ciencias ambientales como en la

evaluación la viabilidad de un proceso de conversión de biogás a gas sintético (Rosha y col., 2021); en el análisis de sensibilidad de la gasificación de residuos agrícolas y ganaderos (Kartal y Özveren, 2021); en el estudio del proceso catalítico de descomposición de poliestireno para producción de combustible Thambiyapillai y Ramanujam, 2021); en la modelización y optimización de la producción de biodiésel a partir de *Euphorbia lathyris* (Adeniyi y col., 2019); en el estudio de la pirólisis de biomasa para la producción de metanol (Arul y col., 2019) y en el análisis de la pirólisis del aceite lubricante usado para convertir materiales de desecho en productos útiles (Adeniyi y col. 2018), por mencionar algunos.

## 7. Marco legal

---

En México existen leyes y normas que establecen los lineamientos para la gestión del agua, que incluye los parámetros que se deben cumplir para medir la calidad del agua, también existen normativas empleadas para el control de fármacos y su uso. La tabla 5 describe las principales leyes y normas relacionadas con el agua en el contexto del presente proyecto.

<b>Tabla 5.</b> Marco legal asociado al proyecto	
<b>Normativa</b>	<b>Descripción</b>
<b>Ley de Aguas Nacionales</b>	Señala en la Fracción XXI, que el desarrollo sustentable en cuestión de recursos hídricos es el proceso evaluable mediante criterios e indicadores de carácter hídrico, económico, social y ambiental que tiende a mejorar la calidad de vida y productividad de las personas (Ley de Aguas Nacionales, 2020)
<b>Artículo 4to de la Constitución Mexicana</b>	Sostiene que toda persona tiene derecho al acceso, disposición y saneamiento de agua para consumo personal y doméstico en forma suficiente, salubre, aceptable y asequible. El Estado

	garantizará este derecho y la ley definirá las bases, apoyos y modalidades para el acceso y uso equitativo y sustentable de los recursos hídricos. (Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos)
<b>Artículo 27 de la Constitución Mexicana</b>	Se dictarán las medidas necesarias para ordenar los asentamientos humanos y establecer adecuadas provisiones, usos, reservas y destinos de tierras, aguas y bosques, a efecto de ejecutar obras públicas y de planear y regular la fundación, conservación, mejoramiento y crecimiento de los centros de población; para preservar y restaurar el equilibrio ecológico (Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos)
<b>Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-2022</b>	Límites Máximos Permisibles de Contaminantes en las descargas de Aguas Residuales en Aguas y Bienes Nacionales, la cual establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales vertidas a aguas y bienes nacionales, con el objeto de proteger su calidad y posibilitar sus usos, y es de observancia obligatoria para los responsables de dichas descargas (SEMARNAT, 2022).
<b>Ley Federal de Sanidad Animal</b>	Tiene como objeto fijar las bases para el diagnóstico, prevención, control y erradicación de plagas y enfermedades que afectan a los animales (Ley Federal de Sanidad Animal, 2018).
<b>NOM-040-ZOO-1995</b>	Establece las condiciones que deben cumplir las personas físicas o morales para la importación o comercialización de sales puras antimicrobianas para la elaboración de medicamentos y alimentos regulados para uso en animales o consumo por éstos (SADER, 1996).
<b>NOM-064-2000</b>	Tiene por objeto establecer los criterios técnicos y científicos para la clasificación, prescripción, comercialización y uso de los ingredientes activos empleados en la formulación de los productos farmacéuticos veterinarios por su nivel de riesgo y así evitar repercusiones en la salud pública (SADER, 2003).
<b>NOM-059-SSA1-2015</b>	Establece los requisitos mínimos requeridos para el proceso de fabricación de los medicamentos para uso humano

	comercializados en el país y/o con fines de investigación (Secretaría de Salud, 2015).
<b>NOM-072-SSA1-2012</b>	Señala los requisitos que deben contener los etiquetados de medicamentos y remedios herbolarios que se comercializan en el territorio nacional, sus instructivos y el etiquetado de las muestras médicas de los mismos (Secretaría de Salud, 2012).
<b>Ley General de Salud</b>	En el Artículo 198 se establece que requieren autorización sanitaria los establecimientos dedicados a la fabricación, proceso y venta de medicamentos (Ley General de Salud, 2022).

Como se observa en la tabla, no existen criterios o especificaciones que establezcan la medición de antibióticos o sustancias similares en el agua, no son considerados como sustancias contaminantes. Sobre la adquisición de medicamentos se menciona que debe llevarse a cabo con receta médica indicada, sin embargo, no se establece la cantidad de antibióticos que puede ser suministrada.

Respecto a los antibióticos de uso veterinario, se mencionan los requerimientos establecidos para su uso en animales, siendo que en otros países se ha prohibido su uso, en México sigue siendo una práctica permitida.

### **7.1. Estrategia Nacional de Acción contra la Resistencia a los Antimicrobianos**

En el año 2015 fue acordado el Plan de Acción Mundial contra la resistencia a los antimicrobianos en el cual se incluyen cinco objetivos principales, los cuales tienen como finalidad implementar herramientas para la prevención y vigilancia principalmente en hospitales ya que son la fuente principal de aplicación de antibióticos y propagación de microorganismos resistentes a antimicrobianos. El Plan se ha ido actualizando con el paso de los años y los países miembros han desplegado diversas medidas para contribuir (OMS 2016; DOF, 2018). En la Unión

Europea y algunos países de América han puesto restricciones en el uso de antibióticos en animales para consumo, entre otras medidas (Baran, y col., 2011).

Como miembro activo de la Organización Mundial de la Salud, México publicó en el año 2018, la Estrategia Nacional contra la Resistencia a los Antimicrobianos para contribuir con el Plan de Acción Mundial y con la Agenda 20/30. En México, las acciones contra la resistencia a los antimicrobianos se han enfocado principalmente en hospitales y centros de salud, con la finalidad de reducir la transmisión y prevenir la selección de bacterias resistentes.

En diversos trabajos científicos se ha argumentado que, sin la inclusión o la consideración de todos los factores y las vías de la RAM en el medio ambiente, los planes de acción de la RAM están incompletos y corren el riesgo de no lograr los objetivos de garantizar y mejorar la eficacia de los antibióticos existentes y futuros (Singer, y col., 2016). La dimensión ambiental de la resistencia a antimicrobianos es un problema bajo estudio, en donde numerosos factores socioambientales e institucionales están interrelacionados entre sí. A este respecto, como parte de las acciones planteadas, en el objetivo número tres, apartado 3.4.3 de la Estrategia Nacional de Acción contra la Resistencia a los Antimicrobianos, se establece: “realizar el monitoreo sistemático y permanente de la calidad del agua, generando datos de calidad a través del monitoreo de cuerpos de agua nacionales, fomentar el tratamiento adecuado de aguas residuales y su reúso, vigilar el cumplimiento de la calidad del agua como fuente de abastecimiento y fortalecer la vigilancia de la calidad del agua en sistemas de abastecimiento” (DOF, 2018).

## **8. Tipo de investigación**

---

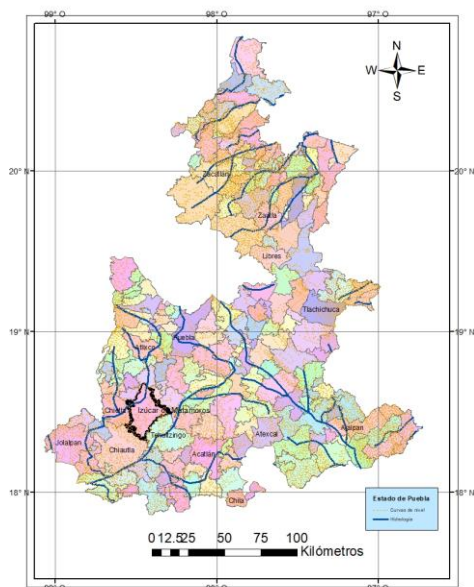
Para el desarrollo de este trabajo se realizará un trabajo de investigación cualitativo con alcance descriptivo (Sampieri, 2014), debido a la poca información disponible de los factores socioecológicos de la zona de estudio, así como por la propuesta conceptual que describe parcialmente las condiciones técnicas del proceso de tratamiento.

El paradigma que está ligado a esta investigación es el constructivista, debido a que se caracteriza por la construcción del conocimiento con base en los conocimientos previos, ya que no se considera al saber cómo absoluto y considera que los fenómenos que están influenciados por acontecimientos sociales están en constante evolución (Ramos, 2015).

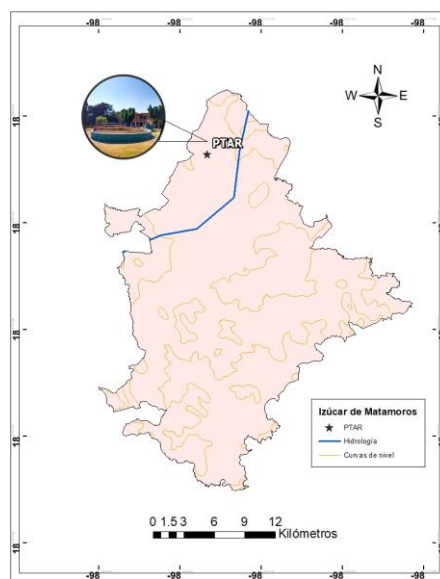
## 9. Metodología

### 9.1. Metodología objetivo 1: Sitio de estudio Planta de tratamiento de aguas residuales Izúcar de Matamoros, Puebla

La PTAR está ubicada en el ejido de San Nicolás Tolentino, perteneciente al municipio de Izúcar de Matamoros, Puebla, como se muestra en la Figura 4, con coordenadas  $18^{\circ} 34.048' N$  y  $98^{\circ} 28.373' O$ . Como se observa en la Figura 5, la planta de tratamiento se encuentra al norte del municipio de Izúcar de Matamoros, fue construida a principios del año 2009, mismo año en el que inició sus operaciones. La planta se construyó con dos trenes de tratamiento, tiene una capacidad instalada de 90 L/s, sin embargo, sólo opera a la mitad de su capacidad que son 45 L/s. La planta trata alrededor del 60% del agua residual municipal urbana, su cuerpo receptor es el río Nexapa (SEMARNAT, 2015). Esta planta de tratamiento se construyó para cumplir con la norma NOM-001-SEMARNAT-1996, que establecía los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en cuerpos de agua y bienes nacionales.



**Figura 4.** Mapa del Estado de Puebla. Elaboración propia.



**Figura 5.** Mapa de ubicación de la PTAR. Elaboración propia.

Para conocer los factores socio-institucionales relacionados a la implementación de la tecnología se llevó a cabo el análisis de actores clave para determinar qué informantes participan y se involucran en la problemática de la PTRA de Izúcar de Matamoros, Puebla, con base en la accesibilidad y disponibilidad de los actores. Una vez identificados los actores clave, se diseñó una guía de entrevista con los aspectos relevantes a tratar y posibles preguntas a realizar. La técnica aplicada fue una entrevista semi-estructurada con preguntas abiertas a cada uno de los actores clave, algunas preguntas se realizaron sin orden con la finalidad de que los entrevistados pudieran expresarse libremente (Pastor, 2007).

Respecto a los entrevistados, se seleccionaron 4 actores clave para cubrir las 4 aristas relevantes en la problemática de la resistencia a los antimicrobianos en el sistema de estudio. Se eligieron actores clave nivel estratégico y nivel táctico pertenecientes al ámbito gubernamental, institucional, académico y social, ya que están directamente involucrados en la toma de decisiones en la zona de estudio en cuestión del agua y poseen la información actual respecto a la planta de tratamiento de aguas residuales y a la comunidad.

Para efectos de investigación se denominó a los entrevistados como:

- Informante 1: Sector académico
- Informante 2: Sector gubernamental
- Informante 3: Sector social
- Informante 4: Sector institucional

Se tomaron como indicadores: el estado de la planta de tratamiento de aguas residuales, la calidad del agua de la planta de tratamiento y las condiciones socioeconómicas de la comunidad.

Se realizó la búsqueda sobre el presupuesto que recibe la PTAR para su operación y mantenimiento en las páginas de transparencia del gobierno federal (<https://www.plataformadetransparencia.org.mx/web>) y en la página del SOSAPAMIM (<https://www.sosapamim.gob.mx/>). La información de las entrevistas nos permitió a su vez, recabar información importante con respecto a la metodología del objetivo específico número 2.

## **9.2. Metodología objetivo 2: Aspectos socioeconómicos**

Con base en el documento público de la Estrategia Nacional contra la resistencia a los antimicrobianos se identificaron los aspectos socioeconómicos e institucionales, se consultó la información de bases de datos nacionales como INEGI, periódicos online, páginas de transparencia del gobierno federal y estatal y otros de carácter público; se solicitó información en las oficinas de transparencia de gobierno del estado, el ayuntamiento del municipio de Izúcar de Matamoros, la SEMARNAT. Se realizó una revisión en la agenda de gobierno actual y se revisaron las iniciativas en el ámbito de salud para el seguimiento de la Estrategia Nacional de Acción contra los Antimicrobianos.

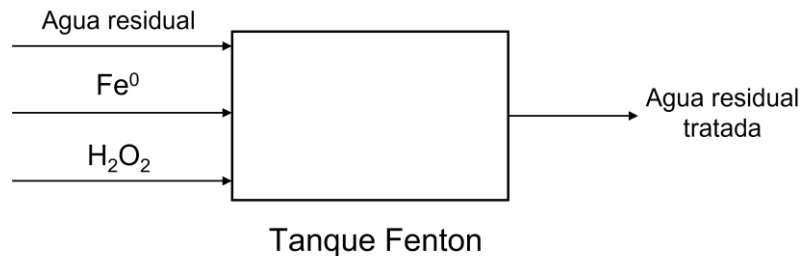
## **9.3. Metodología objetivo 3: Condiciones de reacción óptimas**

Se realizó una recopilación de información técnica buscando palabras clave como “proceso Fenton” “eliminación de antibióticos” “procesos de oxidación avanzada en plantas de tratamiento”, “proceso Fenton, eliminación de bacterias resistentes a antibióticos”, en buscadores como Scopus (<https://www.scopus.com/>), Web of science (<https://www.webofknowledge.com>), Sciencedirect (<https://www.sciencedirect.com/>), EBSCO (<https://www.ebsco.com/es>), CONRICYT (<https://www.conricyt.mx/>), videos, revistas científicas, manuales entre otros. Con base en esos documentos se identificaron las condiciones de operación de trabajo de esta tecnología como tiempo de reacción, pH, tipo y cantidad de catalizador, tipo y cantidad de agente oxidante, temperatura, agitación, etc.

Con base en la metodología para la selección de tecnologías propuesta por el Instituto de Ingeniería de la UNAM (Noyola, y *col.*, 2013), se describieron las condiciones técnicas que están presentes en la PTAR en estudio.

#### 9.4. Metodología objetivo 4: Simulación del Proceso Fenton

Se utilizó el simulador ASPEN- HYSYS V8.8 para modelar y simular el equipo para la oxidación Fenton como propuesta tecnológica para la planta de tratamiento de aguas residuales ubicada en Izúcar de Matamoros, Puebla. Se emplearon condiciones ajustadas a las características de la PTAR con base en resultados reportados en artículos científicos. Se diseñó un diagrama con los equipamientos a simular en el software para tener un precedente (Figura 6). Finalmente se obtuvo el rendimiento del Proceso Fenton con los parámetros seleccionados para la planta de tratamiento en cuestión.



**Figura 6.** Diagrama de bloques para la propuesta del Proceso Fenton, elaboración propia.

A continuación, se mencionan algunas consideraciones que se tomaron en cuenta para el desarrollo de la simulación con las características del Software Aspen HYSYS V8.8:

- Para el modelado, el agua residual que alimenta la planta contiene únicamente sulfametoxazol (C<sub>10</sub>H<sub>11</sub>N<sub>3</sub>O<sub>3</sub>S) como contaminante.
- La concentración de sulfametoxazol utilizada para el modelado fue de 100 µg/L de acuerdo con lo reportado por Goswami, y col. (2021) para sulfametoxazol en aguas residuales municipales.
- Los compuestos no encontrados en la base de datos del software fueron modelados como compuestos hipotéticos con la herramienta HypoManager, tomando en cuenta sus propiedades fisicoquímicas.
- Se estableció como flujo de trabajo 45 L/min

Para el cálculo del volumen del reactor se aplicaron el método basado en los gráficos de Levenspiel, el cual es un modelo gráfico basado en datos experimentales de la reacción química que tiene lugar. Se requiere además conocer datos de conversión, velocidad de reacción o constante de reacción. Se requiere además conocer la estequiometría de la reacción y las ecuaciones de diseño del reactor. De manera general, el procedimiento aplicado fue el siguiente:

1. Se estableció un diagrama de flujo para indicar el tipo de reactor; en este caso se decidió por un tanque agitado homogéneo tanto para la alimentación del agua residual como para los reactivos y productos generados por la transformación. La ecuación que rige el diseño es

$V = F_{AO} \cdot x / -r_A$ , donde  $F_{AO}$  es el flujo molar,  $x$  la conversión y  $r_A$  la constante de reacción.

2. Se consideró un modelo cinético de segundo orden con una  $k = 0.92 \times 10^{-2} \text{ 1/(M} \cdot \text{min)}$  Goswami y col. (2021).
3. El balanceo de la ecuación química utilizada se realizó con la herramienta propia del simulador, tomando como especie de cálculo al sulfametoxazol
4. Se eligió el método de diferencias finitas para el cálculo de la conversión debido a que permite transformar ecuaciones diferenciales como las de los modelos cinéticos en operaciones matemáticas más simples que la ecuación diferencial de partida.

Conversión ( $x$ ) =  $1 - [\text{Sulfametoxazol}_t] / [\text{Sulfametoxazol}_0]$  donde el subíndice  $t$  y  $0$  denotan concentración en el tiempo  $t$  e inicial respectivamente

5. Se calculó la velocidad de reacción a partir de la constante de reacción para cada concentración de sulfametoxazol.

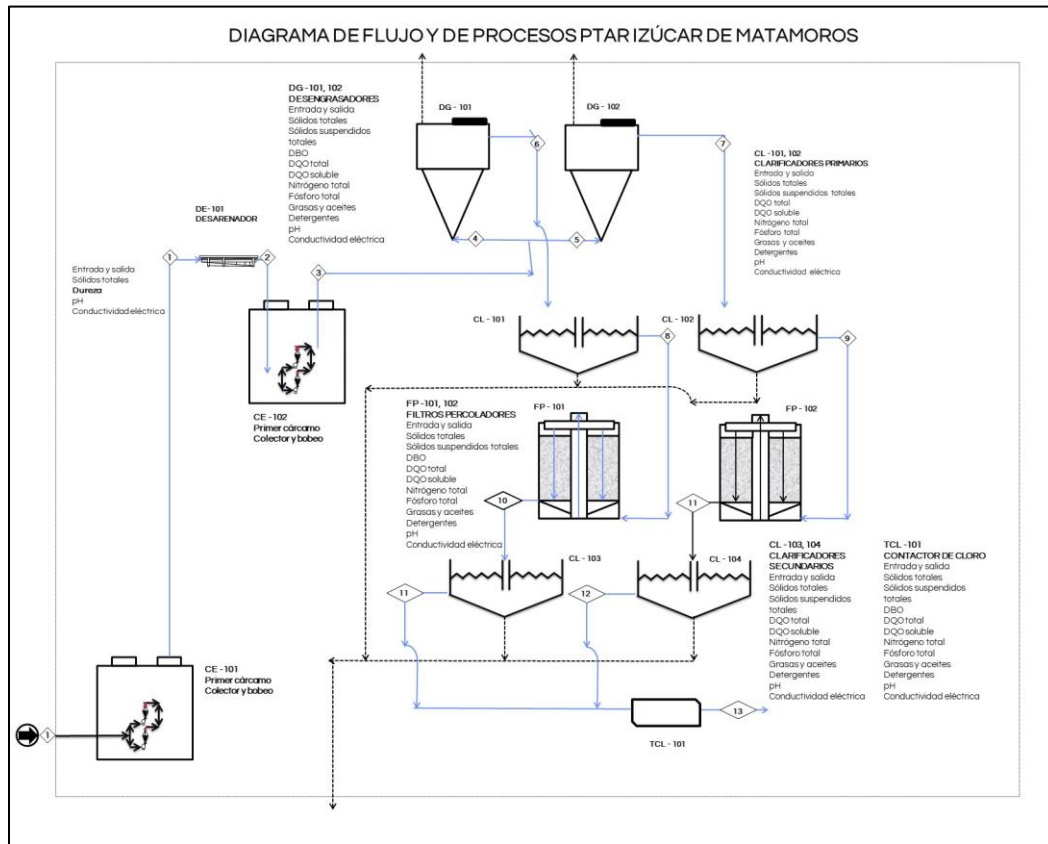
$$r_A = k \cdot [\text{sulfametoxazol}_t]$$

6. Se calculó y graficó la variación de volumen para cada grado de conversión en la cinética con la fórmula  $V = F_{AO} \cdot x / -r_A$
7. Se determina el área bajo la curva a la conversión deseada, lo cual corresponde al volumen de reactor.

## 10. Resultados

### 10.1. Descripción de la Planta de tratamiento de aguas residuales

El tratamiento del agua residual consta de 4 etapas: tratamiento primario, tratamiento secundario, desinfección y disposición final en el cuerpo receptor que es el río Nexapa (Figura 7).



**Figura 7.** Diagrama PTAR.

**Fuente:** Elaboración propia basada en documentación proporcionada por el informante 2.

La depuración del agua residual comienza con un tratamiento primario que consiste en un tanque de cribado grueso del agua cruda, en este se retienen los residuos más grandes, seguido de esto el agua pasa al tanque de igualación con la finalidad de mantener un flujo constante para el tratamiento posterior, el agua es bombeada al tanque de desengrasado en el cual se separa la grasa por medio de un embudo de separación, las grasas y aceites recolectados son concentrados en

el lecho de secado. Posteriormente, el agua pasa a un sedimentador primario, en donde por un tiempo de 2 horas, se deja reposar para que los sólidos se depositen en el fondo mediante gravedad, los sólidos son enviados a un espesador de lodos en donde son neutralizados con la adición de cal y luego son llevados al lecho de secado para su posterior disposición final en el relleno sanitario intermunicipal de Izúcar de Matamoros.

El agua clarificada pasa al tratamiento secundario, el cual consiste en un reactor aerobio de filtros biológicos o percoladores en donde microorganismos degradan la materia orgánica. Este tanque tiene ambos extremos ventilados para que circule el aire, el agua es suministrada por medio de un rociador rotatorio que se encuentra en la parte superior, de esta manera el material filtrante que contiene a los microorganismos pasa por ciclos de inundación y de exposición al aire, permitiendo la digestión aerobia del agua residual.

Como paso siguiente, el agua va a un clarificador secundario en el que los sólidos en suspensión restantes son sedimentados en un tiempo de 2 horas, de igual manera que en el primero, los lodos son enviados al espesador de lodos para su posterior disposición final.

En la última etapa, como tratamiento terciario, el agua pasa por un tanque de cloración para la eliminación de bacterias remanentes y finalmente es descargada en el Río Nexapa (García, 2019).

Se han determinado diversos contaminantes en el efluente de la PTAR, dentro de los cuales destacan los contaminantes orgánicos persistentes, metales pesados, pesticidas y antibióticos, además de la fuerte contaminación biológica, por lo que se considera un ambiente con las condiciones favorables para el desarrollo de microorganismos resistentes a antibióticos (García 2019; Herrera, 2016).

Se pudo constatar que la PTAR ha operado de manera intermitente desde su construcción en el año 2009. Actualmente sólo opera con un tren de tratamiento, por lo que su capacidad es de 45 L/s.

De acuerdo con investigaciones previas, los valores de remoción determinados en el efluente de la PTAR después del clarificador secundario son los siguientes (Tabla 6):

**Tabla 6.** Parámetros del efluente PTAR. Realizada con base en Herrera (2016) y García (2019).

<b>Parámetro</b>	<b>Valor promedio</b>
<b>pH</b>	7.63
<b>Temperatura</b>	23 °C
<b>Eh</b>	-293.92 mV
<b>CE</b>	2.32 S/cm
<b>OD</b>	0.20 mg/L
<b>TUR</b>	54.31 NTU
<b>DBO<sub>5</sub></b>	285.98 mg/L
<b>DQO</b>	455 mgO <sub>2</sub> /L
<b>Nitratos (NO<sub>3</sub><sup>1-</sup>)</b>	178 mg/L
<b>Fosfatos (PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>)</b>	25 mg/L
<b>Sulfatos (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>)</b>	150 mg/L
<b>Níquel (Ni<sup>2+</sup>)</b>	0.21 mg/L

Adicionalmente, se generaron datos recientes de calidad de agua, para ello, se llevaron a cabo dos muestreos, uno en el mes de noviembre de 2019 y otro en marzo del 2020 (Tabla 7), también se realizó un análisis microbiológico preliminar del muestreo del mes de marzo (Tabla 8).

**Tabla 7.** Caracterización del agua 2019, 2020. Elaboración propia

<b>Parámetro</b>	<b>Valor promedio (año)</b>	
	2019	2020
<b>pH</b>	7.4	7.19
<b>Temperatura</b>	23 °C	26 °C
<b>Conductividad</b>	1370	1602
<b>Fosfatos</b>	6.8 mg/L	8.7
<b>Sulfatos (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>)</b>	175	200
<b>Nitratos (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>)</b>	25.75	0.6
<b>DQO</b>	420	495
<b>DBO</b>	127	N.R

N.R. No realizado

**Tabla 8.** Análisis de microorganismos patógenos realizado en marzo 2020. Elaboración propia

Medio de cultivo	Función	N° de cajas	Colonias
<b>Nutritivo</b>	Medio recomendado para el cultivo de gran variedad de bacterias y para el recuento de microorganismos en aguas, heces y otros materiales.	20	Incontables, color claro.
<b>LB</b>	Se emplea para el enriquecimiento y mantenimiento de <i>Escherichia coli</i> .	20	Incontables.
<b>EMB (Eosina Azul de Metileno)</b>	Se emplea como medio diferencial para el aislamiento y diferenciación de bacterias Gram-negativas ( <i>Salmonella</i> y <i>Shigella</i> ), <i>Candida albicans</i> ).	20	Incontables, color negro y rosa transparente.
<b>TCBS (Medio cólera)</b>	Se emplea para el cultivo y aislamiento de <i>Vibrio cholerae</i> y <i>Vibrio parahaemolyticus</i> en productos marinos o muestras de diversos orígenes.	20	2 colonias, color amarillo.
<b>SS (Salmonella y Shigella)</b>	Se emplea para el aislamiento de <i>Salmonella</i> y <i>Shigella</i> a partir de muestras de productos alimenticios u otros que pudieran contener estos gérmenes. Se trata de un medio altamente selectivo.	20	Incontables, color negro y transparente.

**Fuente:** Elaboración propia con base en (CONAMED, 2010)

Con los resultados obtenidos de la muestra de agua, se puede concluir que existe una alta contaminación microbiológica y química, ya que se pudieron identificar diferentes colonias de microorganismos patógenos, y los valores de DQO sobrepasan lo permitido por la normatividad. Estos resultados nos indican que en el agua tratada podrían existir microorganismos que podrían ser resistentes a antibióticos, ya que las condiciones en donde se encuentran son las aptas para el desarrollo y proliferación de microorganismos resistentes a antibióticos, de acuerdo con lo reportado en la literatura (Singer, y col., 2016; Manaia, y col., 2019; Franco, y col., 2009).

Adicionalmente, se cuenta con información no publicada, proporcionada por los informantes entrevistados que permiten una mejor valoración del desempeño de la planta. De acuerdo con el informante 4, la PTAR cuenta con personal calificado para su funcionamiento, se desempeñan 4 personas trabajando en la planta y un

velador que cuida las instalaciones. La planta cuenta con poco personal debido a que los procesos son prácticamente automatizados.

Respecto al presupuesto que se destina a la PTAR, no se encontró información en las páginas de transparencia estatal ni en la página oficial del SOSAPAMIM, este dato se obtuvo a través de nuestro informante 4, quien proporcionó el monto destinado para el funcionamiento y mantenimiento de la PTAR, mismo que asciende aproximadamente a los \$100,000.00 M.N. mensuales, estos se obtienen del pago anual que los pobladores del municipio de Izúcar de Matamoros realizan por el servicio de agua potable.

## **10.2. Condiciones ambientales, económicas y sociales para la implementación del Proceso Fenton**

Desde el 2018, año en que se publicó la Estrategia Nacional de Acción contra la Resistencia a los Antimicrobianos, algunas acciones han contribuido a cumplir con los objetivos 1 y 2. Al respecto, el Plan Universitario de Control de la Resistencia Antimicrobiana (Plan UCRA) de la UNAM, en coordinación con la Secretaría de Salud, instalaron una red de vigilancia en 14 hospitales de los Estados de Guadalajara, Nuevo León, Durango y Ciudad de México que llevan un registro de los patógenos resistentes a antibióticos detectados en sus instalaciones y se ha informado al personal de salud acerca de la gravedad de la RAM (UNAM, 2019). Sin embargo, en la página de la Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión (30 de mayo, 2021), se puede constatar lo siguiente:

En materia de salud, en la agenda de gobierno actual, no se contempla ningún plan de acción o programa para dar seguimiento a la Estrategia Nacional de Acción Contra la Resistencia a los Antimicrobianos. Haciendo una revisión en la agenda nacional, algunos de los temas que acuñen referentes a la salud, son:

- Promover estilos de vida saludables, mediante etiquetado de alimentos, alimentación saludable y actividad física.
- Educación sexual.

- Incluir en aulas escolares el tema sobre uso nocivo del alcohol
- Garantizar el derecho de toda persona a vivir en un ambiente sano de conformidad con los principios de precaución en favor de la naturaleza, regular y evitar la generación de residuos, fragmentos y partículas residuales que impactan de manera negativa al medio ambiente y a la salud.
- Crear un ordenamiento jurídico con el objeto de promover, respetar, proteger y garantizar los derechos humanos asociados con el agua y saneamiento.
- Creación de un fondo para situaciones de emergencia epidemiológica.
- Mejores condiciones para el personal que atienda situaciones de emergencia sanitaria, entre otras.

El objetivo 5 de la Estrategia Nacional de Acción contra los Antimicrobianos tiene como meta asegurar una inversión sostenible para abordar la RAM. El objetivo específico 5.3.2 establece “Apoyo a instituciones nacionales de investigación que realicen estudios para desarrollar nuevos medicamentos, vacunas y herramientas, a costos económicos. Como parte de este objetivo se encontró que el Instituto Nacional de Salud Pública (INSP), tiene una línea de investigación en medicamentos y tecnologías sanitarias, en el año 2007 se creó la línea de investigación sobre “medicamentos en salud pública, uso y resistencia antimicrobiana” en su sitio oficial (<https://www.insp.mx/lineas-de-investigacion/>) encontramos una diversa gama de investigaciones que han aportado información importante acerca de la resistencia a antibióticos en hospitales y en casos clínicos.

Actualmente el INSP en coordinación con el Centro de Investigación sobre Enfermedades Infecciosas (CISEI) llevan a cabo el proyecto de investigación “mapa de uso clínico de antibióticos y de reservorios de genes de resistencia bacteriana en el ambiente de tratamiento de aguas residuales”, en el cual se pretende desarrollar el primer mapa de uso clínico de antibióticos en el Seguro Popular y el Instituto Mexicano del Seguro Social en cinco ciudades de alta población en México. También contempla describir la carga de bacterias de importancia clínica y de genes

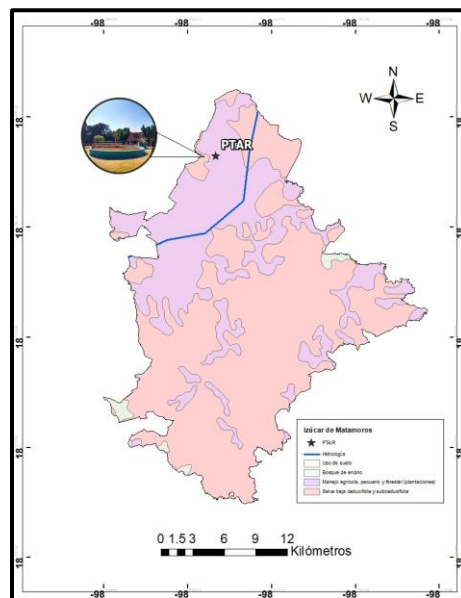
de resistencia que estén presentes en aguas residuales en esas mismas ciudades. Las plantas de tratamiento de agua residual (PTAR) juegan un papel importante en la problemática de la RAM debido a que han sido reportadas en diversos artículos científicos (Kumar y Pal, 2018; Starling, y col., 2020) como fuentes idóneas para el desarrollo de microorganismos resistentes, debido a que las plantas de tratamiento sirven como fuente de nutrientes para éstos y además presentan otras sustancias que generan presión para la resistencia, como plaguicidas, metales pesados y antibióticos. En el objetivo 3 de la Estrategia nacional de acción contra la resistencia a los antimicrobianos, que busca reducir la incidencia de infecciones, encontramos que como parte de los objetivos específicos está el objetivo 3.4.3 el cual menciona “Realizar el monitoreo sistemático y permanente de la calidad del agua, generando datos de calidad a través del monitoreo de cuerpos de agua nacionales, fomentar el tratamiento adecuado de aguas residuales”.

En Puebla se ha empezado a dar difusión sobre el tema de antibióticos y la Resistencia a los Antimicrobianos (RAM), por parte de algunos investigadores de universidades conocidas como la BUAP (Bairán, 2019; Herrera, 2016) y la UDLAP (Paredes, 2021), han creado material para informar a la población sobre la importancia de no automedicarse, sobre terminar tratamientos completos cuando así se ha indicado, entre otras medidas. La limitante es que esta información no puede llegar a todos los sectores de la población, ya que esta se encuentra en plataformas digitales y redes sociales a las que no todos tienen acceso

En el municipio de Izúcar de Matamoros Puebla se practica la agricultura de manera moderada, se cultiva el frijol, el maíz y la caña, siendo este último el principal cultivo de la zona, también se practica la pesca y la apicultura como actividades primarias, el turismo y el comercio también son actividades importantes dentro de la economía del municipio representando el 43.3% de sus ingresos. Izúcar de Matamoros se encuentra dentro de la cuenca del río Atoyac, por lo que los ríos Nexapa y Atotonilco recorren su territorio y permiten a la población realizar actividades que van desde lavar su ropa, regar los cultivos hasta practicar la acuicultura (INEGI,2017). En la zona predomina un clima cálido-húmedo con una temperatura media anual mayor a 22°C. La temperatura de lluvias abarca los meses

de junio a octubre, en estos meses la precipitación media es menor que 10 mm (Navarro, 2021).

La ganadería y la agricultura son actividades esenciales en la economía local (INAFED, 2021), debido a ello, existen líderes que representan los intereses de estos sectores, los cuales se encargan de negociar asuntos de interés colectivo. Actualmente, se cree que algunos de los cultivos agrícolas son regados con agua proveniente de la planta de tratamiento cercana a la zona, es un hecho no reportado, pero la cercanía de la PTAR con las zonas de cultivo es de unos metros (INEGI, 2017). En la Figura 8 se observa que la PTAR se encuentra en la zona marcada como zona de cultivo, por lo que se evidencia la cercanía que tiene con los cultivos los cuales están a sólo unos metros.



**Figura 8.** Mapa de uso de suelos Izúcar de Matamoros, Puebla.  
**Fuente:** Elaboración propia

La planta de tratamiento perteneciente a la localidad de San Nicolás Tolentino se encarga de recibir el 60% aproximadamente de las aguas del municipio (García, 2019), la óptima operación de la planta es de suma importancia, debido a que parte de esta agua tratada desemboca directamente al río Nexapa. Diversas fuentes han reportado que la planta de tratamiento en cuestión opera de manera

irregular, el periódico online Municipios (<https://municipiospuebla.mx/>), reportó el 18 de agosto de 2020 que la PTAR había dejado de operar desde 4 años atrás, también externó que, desde la construcción de la PTAR en 2009, apenas en junio de 2020 se hicieron reparaciones que permitieron el funcionamiento de la PTAR en su totalidad.

En enero de 2020 también se reportó que la PTAR llevaba 12 años sin funcionar de manera eficiente ya que sólo operaba al 70% (Cano, 2020). No sabemos con exactitud cuánto tiempo estuvo detenida la PTAR pues no existe información oficial pública al respecto.

La planta de tratamiento opera con filtros biológicos o percoladores como tratamiento secundario, y como proceso de desinfección utilizan la cloración antes de descargar el efluente al río (García, 2019). Es importante mencionar que se ha reportado que el proceso de cloración no siempre actúa de manera eficiente cuando se trata de eliminar bacterias resistentes a antibióticos (Zhang y col.,2021)

El informante 4 quien pertenece al sector institucional, y está directamente involucrado en las actividades de la planta, informó que la PTAR llevaba cerca de 10 años sin funcionar de manera eficiente, la infraestructura llevaba años sin el mantenimiento adecuado y apenas este año pudo repararse y echarse a andar a una capacidad del 50%. Actualmente el SOSAPAMIM, que es el sistema operador de los servicios de Agua Potable y Saneamiento del Municipio de Izúcar de Matamoros, se encuentra haciendo las adecuaciones necesarias para su operación eficaz aún con las limitantes existentes. El informante 2, quien está directamente relacionado con los temas ambientales en la localidad comentó que la PTAR fue recientemente intervenida, los filtros percoladores de la PTAR se encontraban desgastados y no funcionaban de manera adecuada, recientemente se realizaron modificaciones como la sustitución de los tanques desgastados por tanques de concreto, el informante 2 comenta que desde un inicio, la PTAR presentó problemas de diseño, ya que las dimensiones de los tanques no son proporcionales a los volúmenes de agua recibidos.

Ambos informantes confirmaron que la PTAR recibe descargas sólo municipales ya que no hay industria en la zona; sin embargo, recibe descargas de establecimientos comerciales que contienen sustancias contaminantes como grasas y algunas sustancias químicas. El informante 4 añadió que la PTAR recibe residuos de los hospitales de la ciudad y del rastro municipal. Esta información es de gran relevancia, ya que en las aguas residuales de la PTAR se han encontrado contaminantes como antibióticos, plaguicidas, productos de aseo personal e hidrocarburos (Herrera, 2016).

A través del informante 2 se tiene el dato acerca de las descargas del complejo industrial Puebla-Tlaxcala que recibe el río Nexapa, estas contienen desechos textiles altamente tóxicos. Por otro lado, en un punto del río, sucede el trasvase de  $4 \text{ m}^3 \times \text{seg}^{-1}$  de aguas contaminadas provenientes del río Atoyac, que equivale a la cantidad del agua proveniente de una descarga de agua residual (Navarro, *y col.*, 2014).

En algunas investigaciones de universidades públicas del estado de Puebla (García, 2019, Herrera, 2016, Navarro, *y col.*, 2014) se ha reportado que el agua descargada al río Nexapa es una fuente de contaminantes, se han realizado investigaciones en periodos de tiempo en los cuales la planta de tratamiento no opera y se ha encontrado que el agua presenta una alta cantidad de contaminantes orgánicos persistentes y antibióticos (García, 2019; Herrera, 2016).

El periódico La Jornada de Oriente reportó el 22 de marzo del 2022 que el 80% de ríos, cuencas y presas de Puebla están en semáforo rojo por presentar una fuerte contaminación; Izúcar de Matamoros es mencionado como uno de los municipios que presenta mayor contaminación y problemas con el abastecimiento del agua (Llaven, 2021). Otra de las problemáticas sumadas a la contaminación del agua, es que no se sabe con certeza si el agua es utilizada para riego de cultivos, en el año 2017 la revista Nexos Online afirmó que en la zona de Izúcar de Matamoros los cultivos si son regados con el agua proveniente de Valsequillo, se desconoce con certeza que cultivos son regados de esta manera; sin embargo, este

hecho representa un peligro potencial a la salud para quienes consumen estos productos (Pérez-Castresana, 2017).

El informante 3, quien es habitante del municipio, comentó que, en el año 2021, su esposa presentó una grave infección por una cepa de la bacteria *E. coli*, la cual resultó ser una bacteria resistente a varios antibióticos, por lo que su esposa tuvo que tomar tratamiento durante 3 meses para poder superar la enfermedad. No se encontró información que pudiera indicarnos si este es un hecho aislado; sin embargo, es pertinente hacer una investigación en particular para determinar las enfermedades que son más comunes en la población y conocer sus posibles causas.

En el año 2018, la ONU en coordinación con la Secretaría de Desarrollo Territorial y Urbano e INFONAVIT publicaron un informe sobre la medición del índice de las Ciudades Prósperas (CPI) en México, se trata de una herramienta que permite identificar las áreas de oportunidad y desafíos en las ciudades, para apoyar la toma de decisiones y la creación de política pública en distintos ámbitos de gobierno. El CPI también contribuye al monitoreo de la agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible y se articula la información en seis niveles (calidad de vida, gobernanza y legislación urbana, infraestructura de desarrollo, productividad, sostenibilidad ambiental y equidad e inclusión social), 22 subdimensiones y 40 indicadores que conjuntan los temas prioritarios y de mayor impacto en el desarrollo de las ciudades (<https://onuhabitat.org.mx/index.php/indice-de-las-ciudades-prosperas-cpi-mexico-2018>).

En el año 2018, se aplicó esta herramienta y de acuerdo con el cálculo de CPI, Izúcar de Matamoros presentaba una prosperidad débil (44.45). Uno de los indicadores que se midió fue el de acceso a agua mejorada que indica la cantidad de viviendas urbanas con conexión a fuentes de agua potable, el valor que obtuvo el municipio fue alto, lo que significa que la mayoría de la población cuenta con acceso a agua potable; sin embargo, esto no significa que el acceso sea suficiente o de buena calidad.

Otro indicador que se determinó fue el de tratamiento de aguas residuales que cuantifica el porcentaje de aguas residuales urbanas tratadas, el resultado fue muy alto, por lo cual se consideró que la infraestructura de los tratamientos es suficiente para tratar las aguas residuales generadas en el municipio, se menciona que aunque el resultado sea positivo se deben tomar en cuenta factores como que no se midan todas las fuentes receptoras de aguas residuales o que el volumen de aguas residuales considere las de otro municipio.

El grado de marginación del municipio fue calificado como medio, presenta índices de rezago social más altos que el Estado de Puebla en el ámbito educativo (21.9%), de salud (19.1%) y de alimentación (26%), se estima que el 8.9% de la población en Izúcar no tiene drenaje y que el 6.8% vive en condiciones de hacinamiento. Sobre la gobernanza y legislación urbana, el resultado que Izúcar de Matamoros alcanzó fue un valor muy bajo, lo que significa que la participación ciudadana, la capacidad institucional y la gobernanza es muy débil y tiene un impacto negativo en la prosperidad urbana. Toda esta información es relevante y coincide con la información que obtuvimos de nuestros informantes. En la zona de estudio convergen distintas problemáticas sociales que impiden que los temas ambientales tengan relevancia. El grado de rezago en la población y la falta de un ingreso estable genera que un sector de la población viva al día y que sus preocupaciones prioricen las necesidades básicas por encima de cualquier otra problemática.

Por otro lado, el informante 2 resaltó que uno de los problemas ambientales graves dentro de la población es el relleno sanitario, el cual está rebasado y presenta problemáticas particulares que perjudican a la población de manera directa, ya que existe un gran problema con el manejo de los residuos sólidos. La Dirección de Ecología del municipio de Izúcar creó 6 programas para mitigar los problemas ambientales en la zona, se ha dado prioridad al tema de residuos sólidos porque es un problema perceptible por la población. La mayor limitante que existe en la Dirección de Ecología es la falta de presupuesto, de acuerdo con la información proporcionada por nuestro informante, se hace lo que se puede con el

recurso que les otorgan y se está intentando atender cada problemática con los recursos que se tienen.

Los agricultores son un sector importante porque es una zona productiva. El informante 2 menciona que una de las problemáticas ligada a la agricultura que se practica en la zona es la quema de la caña, la cual, en ciertas estaciones genera una degradación de la calidad del aire, hecho que es muy comentado en la comunidad. Otra problemática es el uso de plaguicidas, ya que perjudican la calidad del suelo y de cuerpos de agua cercanos a través de escurrimientos.

Se realizó una entrevista a uno de los actores principales de la zona, quien es un investigador y activista, con más de 20 años de trabajo en campo y estudios sobre la calidad del agua en cuerpos de agua en Izúcar de Matamoros, nos referimos a él como nuestro informante 1, quien argumentó que los agricultores han tenido un acercamiento con investigadores sobre el tema de la contaminación del agua y el uso de ésta para sus cultivos. Sin embargo, cuestiones más importantes para ellos, como la necesidad de vender sus productos cultivados para obtener un ingreso y así cubrir sus necesidades básicas, sumado a las problemáticas sociales, como el descontento con las autoridades e instituciones quienes en ocasiones han defraudado viejas promesas, son parte de los impedimentos que se presentan para poder realizar colaboraciones con la población y se tome consciencia del tema.

Respecto a la PTAR, el informante 1 comentó que SOSAPAMIM siempre ha estado en la disposición de mejorar los servicios de agua potable; sin embargo, se sabe que la PTAR no se da abasto para cubrir las necesidades que requiere la población. Además, los contaminantes que llegan a esta planta rebasan las tecnologías que se aplican en ella, por lo que es un tema complejo. El informante 4 comenta que años atrás hubo problemas dentro del SOSAPAMIM, por lo que con el cambio de dirección que se realizó en el 2018, se hizo una reestructuración y se optimizaron los procesos para intentar dar pronta solución a las problemáticas del agua en la comunidad.

Se revisaron algunas plataformas de transparencia del Gobierno Federal y Estatal, no se encontró de manera directa el dato sobre el recurso que se destina a

la PTAR, anteriormente mencionamos que el informante 4 mencionó que SOSAPAMIM recibe aproximadamente \$100,000.00 M.N. mensuales para darle mantenimiento a la PTAR. Si embargo, estos ingresos dependen de los pagos puntuales de la población, por lo que se está incentivando a la población para realizar los pagos de manera puntual. Los informantes 2 y 4 consideran que podría actualizarse la planta de tratamiento con procesos que requirieran menores inversiones y que sean amigables con el medio ambiente. El informante 4 informó que para la operación de la planta de tratamiento se cuenta con 4 personas capacitadas y un velador debido a que la operación de la planta de tratamiento es en su mayoría automatizada, sólo se supervisa que se lleven a cabo de manera adecuada los tratamientos.

De acuerdo con la información proporcionada por del informante 4, y la página oficial del SOSAPAMIM ([www.sosapamim.gob.mx](http://www.sosapamim.gob.mx)), supimos que, con la finalidad de abastecer a la población de manera constante con agua potable, se comenzó con la rehabilitación de los pozos de extracción, los cuales desde hace muchos años no habían sido atendidos y presentaban fallas importantes. A través de la página oficial del SOSAPAMIM y de estaciones de radio de la localidad como la mexicana de Izúcar de Matamoros, se ha informado a la población sobre la gestión que realiza el SOSAPAMIM.

Un sector de la población en Izúcar no cuenta con acceso al agua potable y, por ende, tampoco al saneamiento. Este sector de la población es el más vulnerable a las enfermedades y otras afectaciones que pudiera ocasionar la contaminación del agua circundante a la zona. Las autoridades están tratando de atender el problema, pero resulta muy importante darle seguimiento a este proceso.

Acerca de la problemática de la resistencia a los antimicrobianos, podemos decir que el panorama en México es desfavorable en el sistema de estudio en particular, pues otras problemáticas actuales de salud, como las derivadas de la pandemia por COVID-19 y las problemáticas sociales (violencia, inseguridad, bajos niveles educativos, desempleo, etc.), así como la problemática económica, son limitantes principales para que el tema de la RAM sea un tema prioritario y se tomen

medidas para su mitigación. No se encontró información que sustente que las autoridades municipales en Izúcar de Matamoros aborden el problema de la resistencia a los antimicrobianos. Los 4 informantes clave están conscientes de que la problemática de la resistencia a los antimicrobianos es un tema complejo que se debe tratar desde todas las aristas. Sin embargo, consideran que hay problemas más graves que se presentan en el día a día que deben atenderse primero, por lo que aún no hay ningún programa que aborde esta situación en la comunidad.

### **10.3. Condiciones de operación del proceso Fenton para la eliminación de antibióticos**

Se consultaron aproximadamente 70 artículos científicos obtenidos de diversas plataformas científicas, de los cuales solo 10 reportan la degradación del sulfametoxazol en efluentes municipales o industriales. A partir de estos reportes se documentó la aplicación del proceso Fenton como tratamiento en plantas de tratamiento de aguas residuales y su eficiencia en la eliminación de antibióticos, todos ellos reportados a escala piloto. Se encontró que en los últimos años el proceso Fenton se ha investigado con énfasis debido a sus bajos costos, ya que los reactivos empleados son relativamente menos costosos en comparación con otros procesos avanzados de oxidación. El Proceso Fenton ha sido implementado para degradar desde materia orgánica hasta antibióticos y bacterias resistentes a antibióticos (Zhang, *et al*, 2016), presentando una elevada eficiencia de degradación de los contaminantes. Su aplicación para degradar antibióticos ha sido estudiada reportando resultados alentadores (Starling *y col.*, 2021; Segura, *y col.*, 2021; Goswami, *y col.*, 2019; Epold, *y col.*, 2012)

El proceso Fenton puede llevarse a cabo a temperatura ambiente (25° C) y presión atmosférica, sin embargo, también se ha reportado que puede variarse la temperatura para obtener mejores resultados siempre y cuando se cuiden las dosis de los reactivos (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> y el catalizador) (Thomas, *y col.*, 2020). La eficiencia del proceso depende mayormente del pH de la solución. El pH reportado como óptimo ha sido en un rango de 2.5-3 cuando se emplea el catalizador sulfato ferroso

(FeSO<sub>4</sub>) (Babuponnusami y Muthukumar, 2013) sin embargo, la generación de lodos es de las principales problemáticas que se asocian al proceso y a este catalizador. Para aumentar el rango de pH se han realizado mejoras en el proceso, como realizarlo en presencia de luz solar o luz ultravioleta, lo cual permite incrementar el rango a pH neutros y también el uso de catalizadores que permitan ampliar el rango de pH (Goswami, y col., 2020).

Uno de los catalizadores estudiados es el hierro con valencia cero (Fe<sup>0</sup>) y la magnetita (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>), ambos presentan ventajas en comparación con el FeSO<sub>4</sub>, el hierro valencia cero es muy reactivo, por lo que permite una mayor generación de radicales hidroxilos en contacto con el peróxido de hidrógeno, además, se ha estudiado la reutilización de este catalizador debido a su reactividad (Xu, Wu y Zhou, 2019).

El agente oxidante empleado en la reacción Fenton es el peróxido de hidrógeno (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>). La concentración de peróxido de hidrógeno es una determinante en la eficiencia global de degradación del proceso, se ha determinado que, a mayores concentraciones de peróxido de hidrógeno, mayor es la degradación de los contaminantes; sin embargo, la cantidad de peróxido de hidrógeno que no se utiliza en la reacción contribuye a la DQO, por lo que es necesario emplear cantidades de oxidante que reaccionen en su totalidad (Sánchez, 2015).

Los tiempos de reacción reportados varían en el intervalo de 15 min a 2 horas, dependiendo de la composición de los contaminantes y los volúmenes de agua que son tratados (Starling, *et al*, 2021; Goswami y Jiang, 2019).

En la tabla 9 se resumen las condiciones de reacción reportadas para la degradación de algunos contaminantes químicos y biológicos a escala piloto:

**Tabla 9.** Condiciones de reacción del Proceso Fenton a escala piloto aplicado a efluentes reales para degradar micro contaminantes químicos y biológicos.

pH	Catalizador	Relación molar catalizador/H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	Concentración H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	Tiempo de reacción	Desinfección	Referencia
3	FeSO <sub>4</sub>	2:7	0.94 mol/L	60 min	Degradación de plaguicidas y fármacos	(Goswami y Jiang, 2019)
3	FeSO <sub>4</sub>	0.1	0.01 mol/L	2 h	Reducción de genes de resistencia a antibióticos	(Zhang, y col., 2016)
2.5-3	FeSO <sub>4</sub>	2:1	178.01 mg/L	2 h	Degradación de sulfaquinoxalina	(Terán, 2016)
2.8	FeSO <sub>4</sub>	N.R.	189 mg/L	2 h	Degradación de paracetamol	(Bellés, 2018)
7	Fe <sup>2+</sup>	2:1	1000-1020 mg/L	80 min	Desinfección de <i>E. coli</i> (Foto Fenton solar)	(O'Dowd y Pillai, 2020)
7.4	FeSO <sub>4</sub>	1:20	100 mg/L	30 min	Eliminación de genes de resistencia (Foto- Fenton)	(Ahmed, y col., 2020)
5.5	Fe <sup>2+</sup>	1:10	10 mg/L	15 min	Degradación de genes de resistencia α-lactámicos (Foto Fenton Solar)	(Starling, y col., 2021)
3	FeSO <sub>4</sub>	1:75	875 mg/L	60 min	Degradación de antibióticos y bacterias resistentes a antibióticos. (Fenton clásico)	(Macku'ak, et al, 2015)
3	Fe (NO <sub>3</sub> ) <sub>3</sub>	1:25	2.125 g/L	240 min	Degradación de fármacos en agua residual hospitalaria (Fenton Heterogéneo)	(Segura, y col., 2021)
3.5	Fe <sup>2+</sup>	1:5	3.5-4.28 mg/L	30 min	Degradación de amoxicilina en agua residual	(Dehghani, y col., 2013)
3-5	Fe <sup>0</sup>	0.7:1-3.5:1	0.6 - 625	15-60 min	Mineralización de sulfametoxazol	Goswami y col., 2021

N.R. No reportado

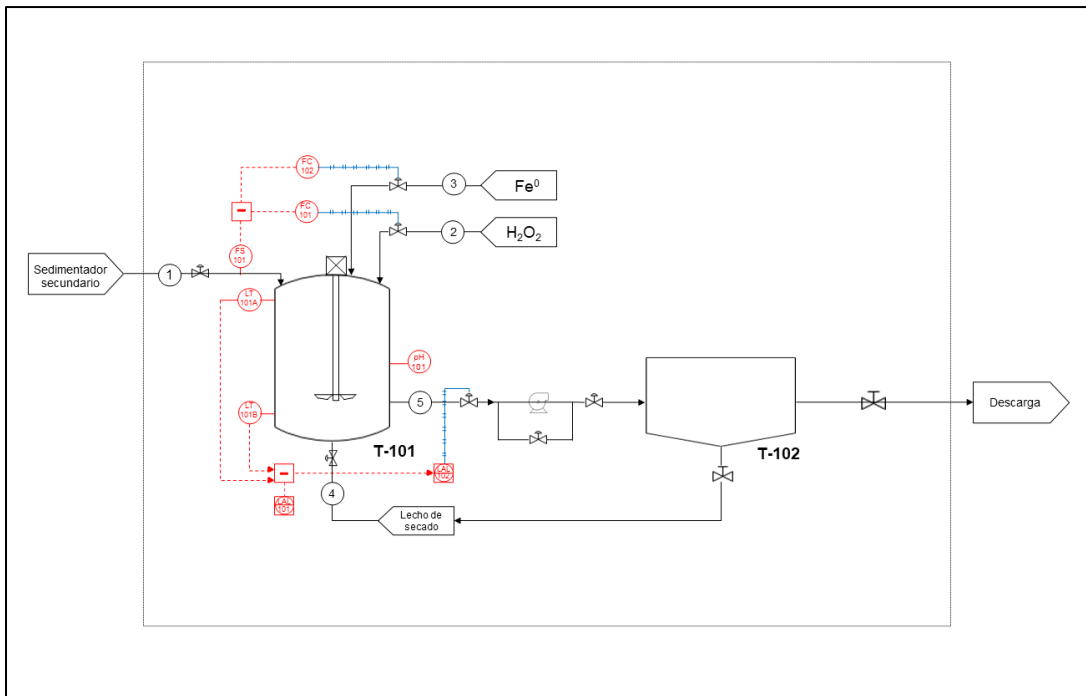
#### 10.4. Simulación del proceso Fenton en el software ASPEN- HYSYS

Con los datos encontrados, se realizó la simulación del proceso Fenton para determinar el tamaño del reactor necesario para implementarlo en la PTAR. Se utilizó la siguiente ecuación estequiométrica de mineralización del sulfametoxazol para simular el Proceso Fenton:



Para el balanceo de las ecuaciones se aplicó la herramienta contenida en el propio software. Los parámetros se ajustaron para un caudal de 162 kg/h

La Figura 9 muestra los elementos que compondrían el proceso a implementar, y la tabla 10 los componentes que se ensayarían para la degradación del sulfametoxazol. Esta etapa del proceso iniciaría conectando el flujo a la salida del sedimentador secundario (de la PTAR existente), antes del tanque de cloración, de hecho, esta propuesta sustituiría la dosificación de cloro ya que el proceso Fenton también puede eliminar microorganismos. Se seleccionó un tanque debido a que el proceso no requiere de ajustes de pH y no sufre un incremento de temperatura el cual requiera equipos más complejos.



**Figura 9.** Diagrama del flujo del Proceso Fenton como propuesta para el tratamiento de aguas residuales.

Los números indican la línea de alimentación o salida.

**Fuente:** Elaboración propia

<b>Tabla 10.</b> Compuestos utilizados en la simulación y el modelo termodinámico empleado		
<b>Modelo termodinámico</b>	<b>NTRL Extendido</b>	
<b>Temperatura</b>	25°C	
<b>Presión</b>	101.325 kPa	
<b>Componente</b>	<b>Nombre</b>	<b>Aspen HYSYS</b>
	Peróxido de hidrógeno	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>
	Hierro Valencia cero*	Fe <sup>0</sup>
	Agua	H <sub>2</sub> O
	Sulfametoxazol*	C10H11N3O3S
	Dióxido de carbono	CO <sub>2</sub>
	Ión sulfato*	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>
	Ión nitrato*	NO <sub>3</sub> <sup>1-</sup>
	Ión ferroso*	Fe <sup>2+</sup>

\*Elementos no encontrados en Aspen Hysys V8.8, modelado como compuestos hipotéticos.

Las condiciones y la composición de las corrientes de entrada para alimentar la simulación se muestran en la Tabla 11.

**Tabla 11.** Condiciones de entrada para la simulación del proceso Fenton de degradación de sulfametoxazol. Elaboración propia

<b>Corriente</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
<b>Temperatura (°C)</b>	26	26	26
<b>Presión (kPa)</b>	101.325	101.325	101.325
<b>Flujo volumétrico (m<sup>3</sup>/h)</b>	162	0.008100260658	0.0088651584
<b>Composición (Fracción mol)</b>			
H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	0	0.3 (50 mg/L)	0
Fe <sup>0</sup>	0	0	1 (54.7 (mg/L)
H <sub>2</sub> O	0.99999961	0.7	0
<b>Sulfametoxazol C<sub>10</sub>H<sub>11</sub>N<sub>3</sub>O<sub>3</sub>S</b>	0.00000039 (100 µg/L)	0	0
CO <sub>2</sub>	0	0	0
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	0	0	0
NO <sub>3</sub> <sup>1-</sup>	0	0	0
Fe <sup>2+</sup>	0	0	0

Para simplificar la simulación, la corriente de entrada es agua con una concentración de sulfametoxazol ( $C_{10}H_{11}N_3O_3S$ ) de  $100 \mu\text{g/L}$  (la concentración de sulfametoxazol ajustada para el volumen del caudal a simular fue de  $0.0632 \text{ kg/h}$ ). Como catalizador se propone usar  $\text{Fe}^0$ , disponible comercialmente, y con la capacidad de mineralizar al sulfametoxazol en agua superficial, y del que se disponen de la constante de reacción y condiciones es de degradación (Goswami y col., 2021). Es importante mencionar que el pH óptimo reportado de la reacción Fenton está en el intervalo 3-5; sin embargo, el pH de la reacción Fenton propuesto para esta simulación es de 7, ya que se ha reportado que el catalizador  $\text{Fe}^0$ , puede oxidar eficientemente compuestos orgánicos a este pH (Thomas, y col., 2021). Esta consideración evita que se tenga que realizar un ajuste de pH en el efluente de la planta de tratamiento, evitando del uso de infraestructura extra y de reactivos.

Se empleó una constante  $k = 0.92 \times 10^{-2} \text{ 1/(M} \cdot \text{min)}$ , reportada por Goswami y col., (2021), que describe la degradación completa del sulfametoxazol a dióxido de carbono usando hierro valencia cero.

Los resultados obtenidos de la simulación se tomaron en relación con el flujo másico reportado en la corriente 1 que es el influente y el flujo de la corriente del final que es el efluente, los datos son los siguientes:

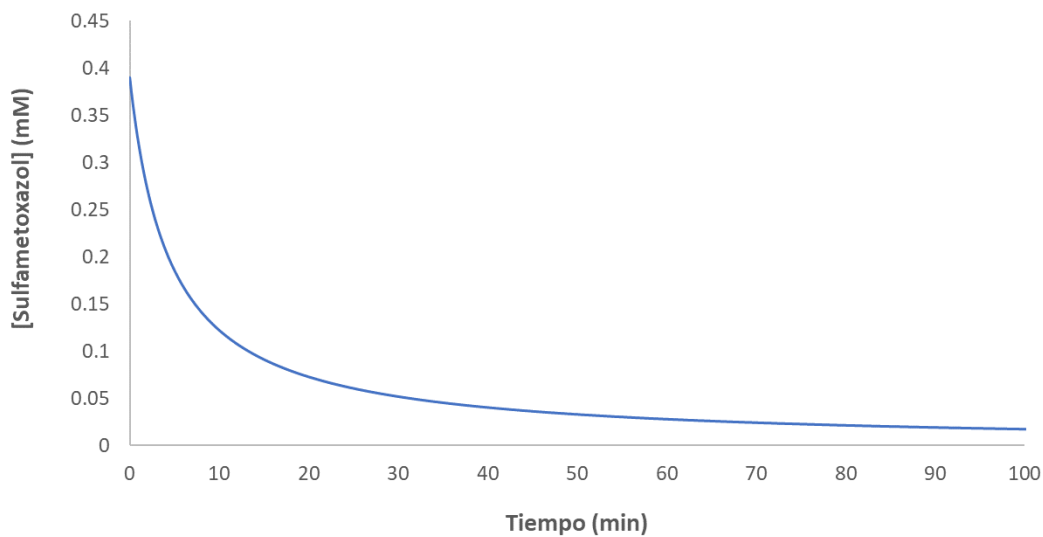
**Tabla 11.** Parámetros corrientes de salida de la simulación Fenton de degradación del sulfametoxazol. Elaboración propia

Compuesto	Flujo másico Kg/h
$\text{H}_2\text{O}$	161678.6767
$\text{Fe}^0$	8.8639
$\text{SO}_4^{2-}$	0.0022
<b>Sulfametoxazol <math>C_{10}H_{11}N_3O_3S</math></b>	0.0013
$\text{CO}_2$	0.0101
$\text{H}_2\text{O}_2$	3.1121
$\text{Fe}^{2+}$	0.0039
$\text{NO}_3^{1-}$	0.0257

El flujo másico de la corriente que contiene sulfametoxazol presenta una disminución importante, del 98%, lo que significa que sí está reaccionando con los

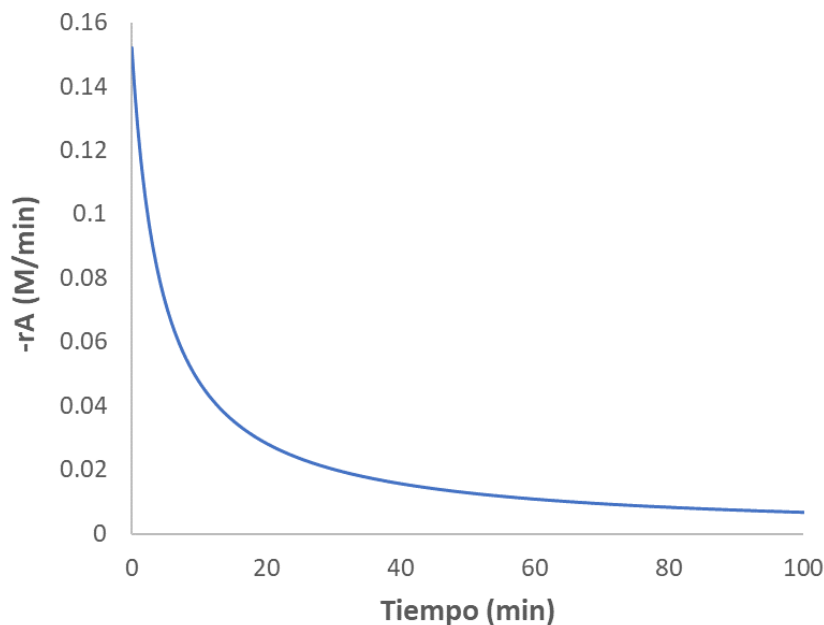
reactivos de Fenton; simultáneamente, se aprecia también la aparición de los iones sulfato y nitrato y también la aparición de dióxido de carbono, representativos de la mineralización del sulfametoxazol. La presencia del ion ferroso significa que el hierro valencia reacciona con el peróxido de hidrógeno, generando la oxidación.

Para el dimensionamiento preliminar de biorreactor se utilizó el caudal de tratamiento de 45 L/min y concentración inicial de Sulfametoxazol de 100  $\mu\text{g/L}$  (0.39  $\mu\text{M}$ ). Para ello se utilizó el método de Levenspiel, el cual requiere de una validación cinética del modelo; sin embargo, dado que no se cuenta con la totalidad de los datos experimentales, solo el final proporcionado por Goswami y col. (2021), quien reportó de un 95 de conversión, se procedió a graficar la cinética de conversión del sulfametoxazol tomando como base su constante de reacción de segundo orden  $k=0.92 \times 10^{-2} \text{ 1}/(\text{M} \cdot \text{min})$ . La cinética obtenida se muestra en la figura 10. Como puede apreciarse, 90% de conversión de sulfametoxazol a  $\text{CO}_2$  se alcanza a los 42 min de reacción. De acuerdo con la cinética, la degradación del sulfametoxazol es exponencial, siendo rápida en los primeros minutos, pero lenta al final del periodo; esto implica que para alcanzar un 5% adicional en la degradación, se requiere el doble de tiempo, de 81 min; y para un 3% adicional, es decir, una conversión del 98% de 227 min de reacción. Este efecto del tiempo repercute directamente en el tamaño del reactor, como se demuestra a continuación.



**Figura 10.** Cinética Cinética de reacción calculada a partir de la constante de degradación del sulfametoxazol  $0.92 \times 10^{-2} \text{ M}^{-1}\text{min}^{-1}$ . Elaboración propia

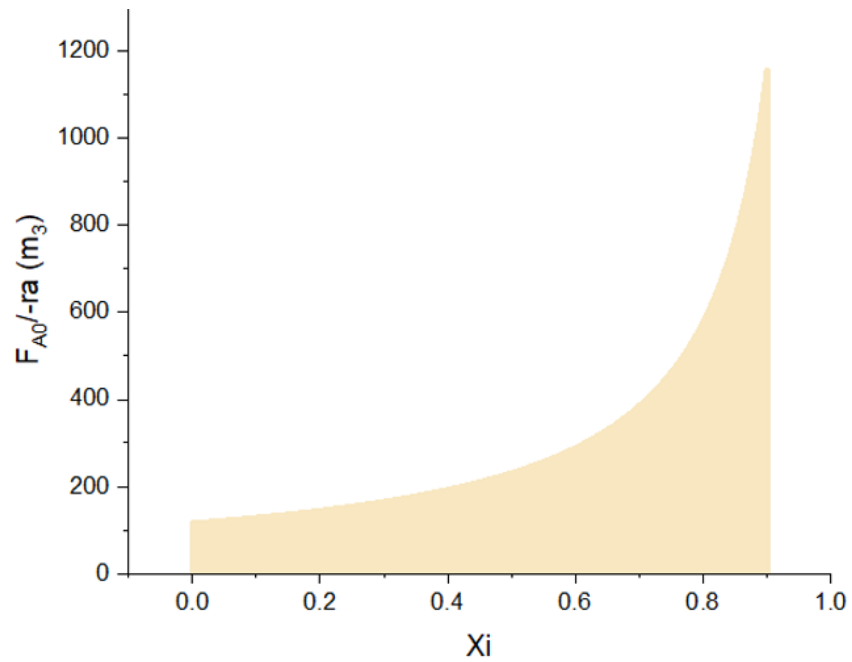
Posteriormente, se calcula la velocidad de reacción en cada minuto de reacción; ya que son afectadas por los cambios en la concentración de sulfametoxazol (Figura 11). Como puede observarse, las velocidades disminuyen importantemente con el tiempo, sobre todo después de los 40 minutos.



**Figura 11.** Cambios en la velocidad de degradación del sulfametoxazol calculados a partir de la constante de reacción  $0.92 \times 10^{-2} \text{ M}^{-1}\text{min}^{-1}$ . Elaboración propia

Este último gráfico es el utilizado para la construcción del gráfico de Levenspiel, de la cual, calculando el área bajo la curva, es posible obtener el tamaño del reactor. Para este trabajo, se calcularon tamaños del reactor para conversiones del 90, 95 y 98%. En la figura 12 se muestran los gráficos de Levenspiel para los porcentajes mencionados. El área de cada gráfico nos proporciona el tamaño del reactor. Para el caso de una degradación del 90% se requiere un tamaño de reactor de  $265 \text{ m}^3$ . Debido a la disminución de la velocidad de reacción a lo largo de tiempo,

la conversión es menor, y para alcanzar degradaciones del 95 y 98%, se obtiene un incremento notable en el tamaño del reactor, de 345 y 451 m<sup>3</sup>, respectivamente.



**Figura 12.** Gráfico de Levenspiel para la degradación del 90% del sulfametoxazol. Elaboración propia. El área bajo la curva indicada hasta la línea punteada representa el volumen del reactor para una conversión del 90%.

## 11. Discusión

---

La PTAR en estudio, diseñada para eliminar nutrientes y materia orgánica bajo la Norma 001-1996 es insuficiente para dar tratamiento adecuado a los efluentes de hoy en día. La forma de operación ha demostrado no ser sostenible desde los diferentes indicadores de sostenibilidad actuales. De acuerdo con Cossio y col. (2020) los indicadores adecuados para plantas de tratamiento para países en desarrollo son como son indicadores del tipo ambiental (sobre el desempeño de la PTAR), tipo económico (sobre costos de operación y mantenimiento así como los ingresos por prestación de servicios), tipo social (sobre la participación de grupos ambientales o comunidad en general, empleados contratados, y expertos asociados al funcionamiento de la planta), tipo técnico (sobre la complejidad del manejo de la PTAR y el uso de infraestructura local para servicios) e institucional (sobre colaboraciones entre instituciones de diferente nivel de gobierno, colaboraciones con universidades o instituciones de investigación y salud. Para la PTAR en estudio, los resultados obtenidos en este y otros trabajos previos demuestran que casi ninguno de estos indicadores se cumple adecuadamente. A nivel institucional, la autoridad municipal no ha cumplido debido a que durante muchos años se dejó de dar el seguimiento adecuado al funcionamiento de la PTAR y al sistema de alcantarillado y saneamiento en general. Como institución, el gobierno municipal, ni las autoridades estatales y federales no han promovido la interacción con Instituciones educativas para el seguimiento y mejora del la PTAR. En el aspecto económico, no se encontró información pública en ninguna de las plataformas y documentos que se consultaron para conocer de manera transparente el ingreso que recibe el SOSAPAMIM y de este cuanto está destinado a la PTAR. Los informantes proporcionaron la información acerca del recurso destinado a las problemáticas ambientales y coinciden en que aún está lejos de ser el necesario para atender todos los problemas de la comunidad. En el aspecto ambiental, la PTAR no cumple con los parámetros de calidad del agua, contiene alta cantidad de nutrientes, alta concentración de materia orgánica biodegradable y no biodegradable, además de microorganismos patógenos, lo que incrementa la

contaminación del río Nexapa. En el aspecto social, no hay participación de la sociedad o grupos ambientales o expertos sobre la falta funcionamiento de la PTAR y la necesidad de su actualización. El caso de esta PTAR no es único, a nivel nacional un elevado número de PTAR no está funcionando correctamente. Por ejemplo, los Gobiernos de Puebla y Tlaxcala destinaron, de 2004 a 2021, 222 millones 478 mil pesos para la construcción y rehabilitación de 60 Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) municipales alrededor del río Atoyac y Zahuapan; sin embargo, éstas siguen sin operar (Diario Reforma, 16 de noviembre del 2021) ; en Jalisco se reportó que en 2020 165 de las 214 PTAR no funcionaban (Diario el informador, edición del 5 de octubre del 2020); lo mismo se ha informado para Durango (Diario el Siglo de Durango, 13 de diciembre del 2015), Hidalgo (La Silla Rota, 17 de mayo 2021). Adicionalmente a la falta de funcionamiento adecuado de la PTAR en estudio, el tren de tratamiento, aun funcionamiento eficientemente, no está diseñado para remover los contaminantes persistentes y emergentes. De hecho, no se encontró información de PTAR a nivel nacional que esté equipada para eliminar estos contaminantes (CONAGUA, 2018 y 2019). Sin duda, la actualización de las PTAR debe pasar primero por una mayor cobertura de saneamiento del agua, actualmente se considera que se trata el 60% de las aguas residuales nacionales, pero considerando el mal funcionamiento de las PTAR este porcentaje es considerablemente menor. La tendencia parecería no cambiar dado que la actualización de la Norma 001 publicada en 2022, no considera monitorear la presencia de estos compuestos. Por otro lado; el aspecto económico resulta ser un factor limitante relevante; como ejemplo comparativo, para la actualización de la PTAR en la Unión Europea se calcula en un monto de inversión y mantenimiento de 18 billones de euros (Comisión Europea, 2019); estos momentos resultan inalcanzables considerando los presupuestos dedicados a la protección ambiental en nuestro país; de acuerdo con INEGI, México dedica anualmente alrededor de 1 739 millones de pesos para saneamiento de agua (INEGI, 2018).

El afluente de la PTAR está exclusivamente conformado por las aguas residuales domésticas de la ciudad de Izúcar de Matamoros; aunque a la red de alcantarillado están conectados también talleres mecánicos, restaurantes, clínicas,

hospitales, salones de belleza; es decir, comercios que pueden ser generados de contaminantes de difícil degradación. Como se mencionó en los antecedentes, en esta PTAR han sido detectados contaminantes emergentes y orgánicos persistentes como fármacos, retardantes de flama, alquilfenoles, y productos de cuidados personal (Herrera, 2016, García, 2019); recientemente, se detectó sulfametoxazol, cafeína, naproxeno y triclosán (Herrera, 2022, comunicación personal). La presencia de contaminantes orgánicos persistentes y emergentes en el efluente de salida de la PTAR confirma la necesidad de una actualización tecnológica para la disminución del impacto ambiental. Las nuevas tecnologías de actualización deben considerar las limitaciones y posibilidades propias de la región, con una alta dosis de innovación y adaptación, que cumplan con las legislaciones locales y que presenten una menor huella de carbono. Bajo este contexto, los criterios de toma de decisiones para seleccionar la tecnología deben integrar la sustentabilidad y la mitigación del cambio climático al técnico – económicos convencionales.

De acuerdo con Noyola y col. (2013), el desarrollo, implementación y operación de una tecnología de tratamiento de agua residual debe cumplir con varios criterios para ser factible: aplicabilidad del proceso, la generación de residuos, la aceptación por parte de la comunidad, la generación de subproductos con valor económico o de uso, la vida útil, el requerimiento de área, costo de inversión inicial, costo de operación y mantenimiento, el requerimiento de reactivos, aspectos de diseño, construcción y operación así como la influencia sobre el entorno e impacto al medio ambiente. Para la propuesta preliminar basada en la aplicación del proceso Fenton, es necesario considerar que la actualización sería efectiva solo si la PTAR funciona adecuadamente, por lo que es necesario que cuente con los mantenimientos preventivos y correctivos realizados en tiempo y forma, que el personal reciba capacitación en la operación y monitoreo. En este trabajo solo se para la actualización abordó el cálculo del tamaño de reactor junto con datos proporcionados por los actores clave y observaciones de campo. El tamaño de reactor propuesto, con las simplificaciones mencionadas, sería de 345 m<sup>3</sup> para una eliminación del 95% del sulfametoxazol; como referencia inmediata, los filtros

percoladores existentes en la PTAR tienen un volumen de 350 m<sup>3</sup>; es decir, el tanque Fenton tendría un tamaño proporcional. La PTAR cuenta actualmente con suficiente un área disponible para la construcción de un tanque y equipo complementario de ese tamaño, de acuerdo a lo observado en las visitas a la PTAR; de hecho, existen unos humedales artificiales abandonados en donde podría colocarse esa infraestructura a la salida del sedimentador secundario. Como es de suponer, los cálculos deberán rehacerse para considerar efluente de salida que fisicoquímica y biológicamente sea similar al efluente de salida de la PTAR. De acuerdo con la literatura, el proceso Fenton parece ser eficiente para la degradación de compuestos persistentes, emergentes y microorganismos (Tabla 9). Además, en términos económicos parece ser competitivo; en el trabajo Mousseta y col. (2021) el tratamiento Fenton resulta ser el más rentable entre los procesos avanzados de oxidación; su cálculo incluyó el uso de productos químicos y el consumo de electricidad (Mousset y col., 2021). Una de sus desventajas es que funciona mejor a pH ácido, y genera lodos; con la ventaja potencial de llevar a la degradación completa a los contaminantes o eliminar la toxicidad de los mismos (Nishanth y col. 2020). El uso de hierro valencia cero con peróxido de hidrógeno parece no tener desventajas dado la disponibilidad, baja generación de lodos (Goswami y col., 2021; Ishag y col., 2020) y costo de los químicos (el costo del peróxido de hidrógeno grado industrial encontrado fue de 8.00 M.N./L., <https://dir.indiamart.com/impcat/hydrogen-peroxide.html>); mientras que el hierro valencia cero el costo más barato encontrado fue de \$1 600.00 M.N./kg (<https://clu-in.org/download/remed/cr-05-007-env.pdf>).

La propuesta de la actualización de la PTAR en estudio debe considerar de manera profunda los aspectos comentados por Noyola y col (2003) así como los indicadores de sustentabilidad reportados por Cossio y col. (2020) para asegurar el éxito en la implementación y operación de la nueva tecnología. El involucramiento de la sociedad, en colaboración con la Academia puede ser un factor clave para solicitar de manera efectiva la atención del gobierno de los diferentes niveles para la reactivación y actualización de la PTAR, y con ello minimizar el impacto ambiental y en la salud humana.

## 12. Conclusiones

---

La PTAR de Izúcar de Matamoros no opera conforme a lo planeado desde su construcción debido a múltiples factores, principalmente institucionales, dado que las autoridades encargadas han descuidado su mantenimiento por años. No se tiene información pública del desempeño en cuanto a la calidad del fluente de salida, los datos generados en las investigaciones académicas indican que el agua está fuertemente contaminada. Dada la cantidad de nutrientes, materia orgánica, contaminantes persistentes y emergentes presentes en el efluente de salida, es necesario que se rehabilite la PTAR y además se actualice la tecnología para incluir un proceso avanzado de oxidación. El proceso Fenton parecer ser adecuado dada su potencial capacidad de mineralizar los contaminantes, inactivar microorganismos, no generar malos olores, no demandar grandes cantidades de energía, disminuir la toxicidad y la disponibilidad de materiales y reactivos. El desarrollo de la propuesta requiere un análisis profundo de los factores de factibilidad y sustentabilidad del proceso.

## 13. Bibliografía

---

- 1- Adeniyi A.G., Ighalo J.O., Adeoye A.S., Onifade D.V. (2019). Modelling and optimisation of biodiesel production from *Euphorbia lathyris* using ASPEN Hysys. *SN Applied Sciences*. 1(11), 1452, DOI 10.1007/s42452-019-1522-0.
- 2- Adeniyi A.G., Adewoye L.T., Ighalo J.O. (2018). Computer aided simulation of the pyrolysis of waste lubricating oil using aspen Hysys. *Environmental Research, Engineering and Management*. 74(2): 52-57, DOI10.5755/j01.erem.74.2.20537
- 3- Arul M., Dinesh Kumar M., Ramanathan A. (2019). Aspen HYSYS simulation of biomass pyrolysis for the production of methanol. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 312 (1). 12015, DOI10.1088/1755-1315/312/1/012015
- 4- Aguilar, U. I. (2007). *Las cuencas y la gestión del riesgo a los desastres naturales en Guatemala*. Ciudad de Guatemala, Guatemala: Serviprensa S.A.
- 5- Ahmed, M. B. M., Rajapaksha, A. U., Lim, J. E., Vu, N. T., Kim, I. S., Kang, H. M., Lee, S. S., & Ok, Y. S. (2015). Distribution and accumulative pattern of tetracyclines and sulfonamides in edible vegetables of cucumber, tomato, and lettuce. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 63(2), 398–405. <https://doi.org/10.1021/jf5034637>
- 6- Ahmed Yunus, Lu Ji, Yuan Zhiguo, L. Bond Philip, Guo Jianhua. (2020). Efficient inactivation of antibiotic resistant bacteria and resistance genes by photo-Fenton process under visible LED light and neutral pH. *Water Research*. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.115878>
- 7- Ait Kadi, M. (2014). Integrated Water Resources Management (IWRM): The international experience. En *Integrated Water Resources Management in the 21st Century: Revisiting the Paradigm* (pág. 308). Londres, UK: CRC Press.
- 8- Alekshun, M., & Levy, S. (2007). Molecular Mechanisms of Antibacterial Multidrug Resistance. *PubMed*, 1037-1050.
- 9- Arnold, C. M., & Osorio, F. (Abril de 1998). *Introducción a los conceptos básicos de la Teoría General de Sistemas*. Obtenido de Redalyc: <https://www.redalyc.org/pdf/101/10100306.pdf>

8. Babuponnusami A., Muthukumar K. (2013). A review on Fenton and improvements to the Fenton process for wastewater Treatment. *Journal of Environmental Chemical Engineering* 186. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jece.2013.10.011>
9. Bairán, G., Rebollar-Pérez, G., Chávez-Bravo, E., & Torres, E. (2020). Treatment processes for microbial resistance mitigation: The technological contribution to tackle the problem of antibiotic resistance. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(23), 1–20. <https://doi.org/10.3390/ijerph17238866>
10. Baran, W., Adamek, E., Ziemińska, J., & Sobczak, A. (2011). Effects of the presence of sulfonamides in the environment and their influence on human health. Poland.
11. Barancheshme, F., & Munir, M. (17 de Enero de 2018). *Strategies to combat antibiotic resistance in the wastewater treatment plants*. Obtenido de [doi:10.3389/fmicb.2017.02603](https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.02603)
12. Barliza Colorado V.D., Torres Chisino D.L. (2018). *Evaluación de los procesos de oxidación avanzada Fenton, UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> y Foto-Fenton para la degradación de clorpirifós en aguas residuales a nivel laboratorio*. [Tesis de grado no publicada] Universidad de Cartagena.
13. Belles, I. C. (2018). *Estudio del proceso Foto-Fenton con dosificación de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> para el tratamiento de aguas residuales con paracetamol*. Barcelona.
14. Ben, W., Wang, J., Cao, R., Yang, M., Zhang, Y., Qiang, Z. (2017). Distribution of antibiotic resistance in the effluents of ten municipal wastewater treatment plants in China and the effect of treatment processes, *Chemosphere*, [doi: 10.1016/j.chemosphere.2017.01.041](https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.01.041).
15. Bentancur, A., Bennett, N., Fernández, F., & Kurioka, M. (2017). *El diseño y la implementación de los planes nacionales de Resistencia Antimicrobiana a partir de la comunicación de riesgos, de la teoría a la acción*. Uruguay.
16. Bermeo Garay Martha Mirella (2016). *Tratamiento de aguas residuales: Técnicas convencionales Segunda Edición Actualizada y mejorada*. Grupo Compás. Obtenido de: <http://hdl.handle.net/123456789/68>
17. Białk-Bielińska, A., Stolte, S., Arning, J., Uebers, U., Bösch, A., Stepnowski, P., & Matzke, M. (2011). Ecotoxicity evaluation of selected sulfonamides. *Chemosphere*, 85(6), 928–933. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2011.06.058>

18. Boelee, E., Geerling, G., Van der Zaan, B., Blauw, A., & Vethaak, A. D. (2019). Water and health: From environmental pressures to integrated responses. *Acta Tropica*, 217-226.
19. Bytesnikova, Z., Richtera, L., Smerkova, K., & Adam, V. (2019). Graphene oxide as tool for antibiotic-resistance gene removal: a review. *Environmental Science and Pollution Research*, 20148–20163.
20. Cámara de Diputados LXV Legislatura. (14 de mayo de 2021). Cámara de Diputados. Recuperado el 14 de mayo de 2021 de: <http://www.diputados.gob.mx/>
21. Calvo, J., & Martínez-Martínez, L. (2009). Mecanismos de acción de los antimicrobianos. *Enfermedades Infecciosas y Microbiología Clínica*, 27(1), 44–52. <https://doi.org/10.1016/j.eimc.2008.11.001>
22. Cano Lydchy (15 de agosto de 2020). Planta de tratamiento de agua en Izúcar lleva 4 años sin funcionar. *MUNICIPIOS*. Recuperado de: <https://municipiospuebla.mx/nota/2020-08-15/izucar-de-matamoros/planta-de-tratamiento-de-agua-en-iz%C3%BAcar-lleva-4-a%C3%B1os-sin>
23. Cano Lydchy (28 enero 2020). Planta de tratamiento de aguas en Izúcar opera al 70%. *MUNICIPIOS*. Recuperado de: <https://municipiospuebla.mx/nota/2020-01-28/izucar-de-matamoros/planta-de-tratamiento-de-aguas-en-iz%C3%BAcar-opera-al-70>
24. Castro, L., Baños, M., López, M., & Torres, B. (2015). Ecofarmacovigilancia en México: perspectivas para su implementación. *Revista Mexicana de Ciencias Farmacéuticas*, 46(3), 16–40.
25. Cheong, M. S., Seo, K. H., Chohra, H., Yoon, Y. E., Choe, H., Kantharaj, V., & Lee, Y. B. (2020). Influence of sulfonamide contamination derived from veterinary antibiotics on plant growth and development. *Antibiotics*, 9(8), 1–18. <https://doi.org/10.3390/antibiotics9080456>
26. Chereau, F., Opatowski, L., Tourdjman, M., & Vong, S. (5 de Septiembre de 2017). *Risk assessment for antibiotic resistance in South East Asia*. Obtenido de thebmj: BMJ 2017;358:j3393 <http://dx.doi.org/10.1136/bmj.j3393>
27. Clemente, R. A., Chica, L. E., & Peñuela, A. G. (2014). Aplicación del proceso Fenton en el tratamiento de aguas residuales de origen petroquímico. *Ingeniería y Competitividad*, 211-223.

28. Collignon, P., Athukorala, P. C., Senanayake, S., & Khan, F. (2015). Antimicrobial resistance: The major contribution of poor governance and corruption to this growing problem. *PLoS ONE*, *10*(3), 1–13. doi.org/10.1371/journal.pone.0116746
29. Comisión Europea (2019). Evaluation of the Council Directive 91/271/EEC of 21 May 1991, concerning urban waste-water treatment. (<https://ec.europa.eu/environment/water/water-urbanwaste/pdf/UWWTD%20Evaluation%20SWD%20448701%20web.pdf>)
30. CONAGUA. (2012). *Agenda del agua 2030. Avances y logros 2012*. Ciudad de México: SEMARNAT.
31. CONAGUA. (2018). *Estadísticas del agua en México*. México: SEMARNAT.
32. CONAGUA. (2019). *Estadísticas del agua en México*. México: SEMARNAT.
33. CONAGUA. (2018). *Estadísticas del agua en México, edición 2018*. Ciudad de México.
34. CONAMED. (2010). *Manual Básico de Microbiología*. España.
35. CONAMED. (2018). *conamed.gob.mx*. Obtenido de conamed.gob.mx: [http://www.conamed.gob.mx/gobmx/boletin/pdf/boletin22/numero\\_completo.pdf](http://www.conamed.gob.mx/gobmx/boletin/pdf/boletin22/numero_completo.pdf)
36. *Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos*. México, 5 Febrero 1917, disponible en esta dirección: <https://www.refworld.org/es/docid/57f795a52b.htm> [Accesado el 1 marzo 2022]
37. Cossio, C., Norrman, J., McConville, J., Mercado, A., Rauch, S. (2020). Indicators for sustainability assessment of small-scale wastewater treatment plants in low and lower-middle income countries. *Environmental and Sustainability Indicators* *6*, 1-11.
38. Dehghani, S., Jafari, A. J., Farzadkia, M., & Gholami, M. (2013). Sulfonamide antibiotic reduction in aquatic environment by application of fenton oxidation process. *Journal of Environmental Health Science and Engineering*, *10*(1), 2–6.
39. Dreser, A., Wirtz, V. J., Corbett, K. K., & Echániz, G. (2008). Uso de antibióticos en México: revisión de problemas y políticas. *Salud Pública de México*, *50*(2), S480–S487. <https://doi.org/10.1590/s0036-36342008001000009>
40. Dirk, V. E., & Bailey, M. J. (2002). The ecology of transfer of mobile genetic elements. *FEMS, Microbiology Ecology* (*42*), 187-197.
41. DOF. (2018). *Acuerdo por el que se declara la obligatoriedad de la Estrategia Nacional de Acción contra la Resistencia a los Antimicrobianos*. México.

42. Doumic Lucila Inés (2015). Nuevas estrategias para la oxidación catalítica de compuestos orgánicos en medio acuoso. Facultad de ciencias exactas y naturales. Buenos aires.
43. Epold, I., Dulova, N., Veressinina, Y., & Trapido, M. (2012). Application of ozonation, UV photolysis, Fenton treatment and other related processes for degradation of ibuprofen and sulfamethoxazole in different aqueous matrices. *Journal of Advanced Oxidation Technologies*, 15(2), 354–364. <https://doi.org/10.1515/jaots-2012-0215>
44. Franco, B. E., Martínez, M. A., Sánchez Rodríguez, M. A., & Wertheimer, A. I. (2009). The determinants of the antibiotic resistance process. *Infection and Drug Resistance*, 2(1), 1–11. <https://doi.org/10.2147/idr.s4899>
45. FEA. (2006). *El agua en México: lo que todas y todos debemos saber*. México.
46. FEA. (18 de Julio de 2019). *Agua.org.mx*. Obtenido de *Agua.org.mx*: <https://agua.org.mx/editoriales/derecho-humano-al-agua/>
47. Fernández, C. A. (2012). El agua: un recurso esencial . *Química Viva*, Vol. 11, núm. 3, 147-170.
48. Forero, J. E., Ortiz, O. P., & Ríos, F. (2005). Aplicación de procesos de oxidación avanzada como tratamiento de fenol en aguas residuales industriales de refinería. *Ciencia Tecnología y Futuro* , 1-14.
49. Gao, Q., Deng, W., Gao, Z., Li, M., Liu, W., Wang, X., & Zhu, F. (2019). Effect of sulfonamide pollution on the growth of manure management candidate *Hermetia illucens*. *PLoS ONE*, 14(5), 1–12. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0216086>
50. García Zamora José Luis (2019). Nanofibras biocatalíticas de quitosano para la degradación de retardadores de flama como contaminantes orgánicos persistentes. Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Ciudad de Puebla.
51. Giannakis, S., Melvin Le, T.-T., Entenza, J.M., Pulgarin, C., Solar photoFenton disinfection of 11 antibiotic-resistant bacteria (ARB) and elimination of representative AR genes. Evidence that antibiotic resistance does not imply resistance to oxidative treatment, *Water Research* (2018), doi: 10.1016/j.watres.2018.06.062
52. Gil, M. J., Soto, A. M., Usma, J. I., & Gutiérrez, O. D. (2012). Contaminantes emergentes en aguas: efectos y posibles tratamientos. *Producción + Limpia*, 52-73.
53. Goswami, A., & Jiang, J. Q. (2019). Comparative performance of catalytic fenton oxidation with Zero-Valent Iron (Fe(0)) in comparison with ferrous sulphate for the

- removal of micropollutants. *Applied Sciences (Switzerland)*, 9(11), 1–15. <https://doi.org/10.3390/app9112181>
54. Goswami, A., Jiang, J. Q., & Petri, M. (2021). Treatability of five micro-pollutants using modified Fenton reaction catalysed by zero-valent iron powder (Fe(0)). *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(4). <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.105393>
  55. Gutiérrez Muñoz Jetzamín, Ramírez Corona Alfredo Morayta, Martínez Bustamante María Elena, Coria Lorenzo José de Jesús, Armenta Gallegos Lauro, Ayala Franco Juan Ramón, Bernal Granillo Sergio Manuel, Flores Zaleta Fernando José, García Pérez Fernando Elías, Monjardín Rochín José Alfonso, Martínez Fuentes Gustavo, Gutiérrez Muñoz, Suárez Cuenca Juan Antonio (2017). Estudio multicéntrico de resistencias bacterianas nosocomiales en México. *Revista Latinoamericana de infectología pediátrica*. Vol. 30, núm. 2. Pp 68-75.
  56. Herrera Cárdenas, J. A. (2017). *Evaluación de la Remoción de Contaminantes Emergentes de Aguas Superficiales Mediante Humedales de Tratamiento*. Benemérita Universidad Autónoma de Puebla.
  57. Heuer, H., Schmitt, H., & Smalla, K. (2011). Antibiotic resistance gene spread due to manure application on agricultural fields. *Current Opinion in Microbiology*, 14(3), 236–243. <https://doi.org/10.1016/j.mib.2011.04.009>
  58. Ibrahim, M., Ahmad, F., Yaqub, B., Ramzan, A., Imran, A., Afzaal, M., Mirza, S. A., Mazhar, I., Younus, M., Akram, Q., Taseer, M. S. A., Ahmad, A., & Ahmed, S. (2019). Current trends of antimicrobials used in food animals and aquaculture. In *Antibiotics and Antimicrobial Resistance Genes in the Environment: Volume 1 in the Advances in Environmental Pollution Research Series*. Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818882-8.00004-8>
  59. Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) (2017). Anuario estadístico y geográfico de Puebla 2017. INEGI. Recuperado de: [https://www.datatur.sectur.gob.mx/ITxEF\\_Docs/PUE\\_ANUARIO\\_PDF.pdf](https://www.datatur.sectur.gob.mx/ITxEF_Docs/PUE_ANUARIO_PDF.pdf)
  60. INEGI (2018). Indicadores de Protección, Gestión y Compromiso con el Medio Ambiente. <https://www.inegi.org.mx/temas/gastopub/>.
  61. Instituto Nacional de Salud Pública (INSP). (14 de mayo de 2021). Línea de investigación en Medicamentos y tecnologías sanitarias. INSP. Recuperado el 14 de mayo de 2021 de <https://www.insp.mx/lineas-de-investigacion>

62. Instituto Nacional para el Federalismo y el Desarrollo Municipal (INAFED) (7 de marzo 2021). Enciclopedia de los municipios y delegaciones de México, Estado de Puebla, Izúcar de Matamoros. Recuperado de: <http://www.inafed.gob.mx/work/enciclopedia/EMM21puebla/municipios/21085a.html>
63. Ishag A, Li Y, Zhang N, Wang H, Guo H, Mei P, Sun Y. (2020). Environmental application of emerging zero-valent iron-based materials on removal of radionuclides from the wastewater: A review. *Environmental Research*. Sep;188:109855. doi: 10.1016/j.envres.2020.109855.
64. Magalhaes P., Grainha A.P., T., Alves, D., Sousa, M., Lopes, S. P., & Pereira, M. O. (2019). Antimicrobial resistance three ways: healthcare crisis, major concepts and the relevance of biofilms. *FEMS Microbiology Ecology* 95(8), doi: 10.1093/femsec/fiz115
65. Kartal F., Özveren U. (2021). A comparative study for biomass gasification in bubbling bed gasifier using Aspen HYSYS. *Bioresource Technology Reports*, 13,100615, DOI 10.1016/j.biteb.2020.100615
66. Kokoszka K, Wilk J, Felis E, Bajkacz S, (2021). Application of UHPLC-MS/MS method to study occurrence and fate of sulfonamide antibiotics and their transformation products in surface water in highly urbanized areas, *Chemosphere*, Volume 283, doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.131189.
67. Kumar, A., & Pal, D. (2018). Antibiotic resistance and wastewater: Correlation, impact and critical human health challenges. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 6(1), 52–58. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2017.11.059>
68. Ley de Aguas Nacionales, Publicada en el D.O.F. el 01 de diciembre de 1992. Última Reforma Publicada 6 de Enero de 2020.
69. Ley de Sanidad Animal, Publicada en el D.O.F el 25 de julio de 2007. Última Reforma Publicada 16 de enero de 2018.
70. Ley General de Salud, publicada en el D.O.F. el 7 de febrero de 1984, Reforma publicada el 30 de marzo del 2022.
71. Lima, M. L., Escobar, J. F., Massone, H., & Martínez, D. (2012). Modelación geoespacial exploratoria en cuencas de llanura: Caso de aplicación en la Cuenca del Arroyo Dulce, Buenos Aires, Argentina. *Tecnología y Ciencias del Agua*, vol. III, núm. 2, 51-65.

72. Ling Zhang, Changzhou Yan, Ran Qi, Fan Yang (2022). Quantifying the contribution rates of sulfonamide antibiotics removal mechanisms in constructed wetlands using multivariate statistical analysis, *Environmental Pollution, Volume 292, Part B*, doi.org/10.1016/j.envpol.2021.118463.
73. Llaven Anzures Yadira (22 marzo 2021). En semáforo rojo, 80% de ríos, cuencas y presas de Puebla por “fuerte contaminación”: CONAGUA. *La jornada de oriente*. Recuperado de: <https://www.lajornadadeoriente.com.mx/puebla/en-semaforo-rojo-80-de-rios-cuencas-y-presas-de-puebla-por-fuerte-contaminacion-conagua/>.
74. Lobato Tapia, Carlos Alberto (2019). Resistencia a antibióticos: cuando nuestro armamento se torna ineficiente. *Revista Digital Universitaria (RDU)*. Vol. 20, núm. 5. Septiembre-octubre. <http://doi.org/10.22201/codeic.16076079e.2019.v20n5.a4>
75. Lopez, V. D., Torres, C. M., & Prada, Q. C. (2016). Genes de resistencia en bacilos Gram negativos: Impacto en la salud pública en Colombia. *Universidad y Salud 18(1)*, 190-202.
76. Lu, Z., Na, G., Gao, H., Wang, L., Bao, C., & Yao, Z. (2015). Fate of sulfonamide resistance genes in estuary environment and effect of anthropogenic activities. *Science of the Total Environment*, 429-438.
77. Macku’ak, T., Nagyová, K., Faberová, M., Grabic, R., Koba, O., Gál, M., & Birošová, L. (2015). Utilization of Fenton-like reaction for antibiotics and resistant bacteria elimination in different parts of WWTP. *Environmental Toxicology and Pharmacology*, 40(2), 492–497. <https://doi.org/10.1016/j.etap.2015.07.002>
78. Ma, F., Xu, S., Tang, Z., Li, Z., & Zhang, L. (2021). Use of antimicrobials in food animals and impact of transmission of antimicrobial resistance on humans. *Biosafety and Health*, 3(1), 32–38. <https://doi.org/10.1016/j.bsheal.2020.09.004>
79. Makowska, N., Koczura, R., & Mokracka, J. (2016). Class 1 integrase, sulfonamide and tetracycline resistance genes in wastewater treatment plant and surface water. *Chemosphere*, 1665-1673.
80. Manaia, C. M., Rocha, J., Scaccia, N., Marano, R., Radu, E., Biancullo, F., Cerqueira, F., Fortunato, G., Iakovides, I. C., Zammit, I., Kampouris, I., Vaz-Moreira, I., & Nunes, O. C. (2018). Antibiotic resistance in wastewater treatment plants: Tackling the black box. *Environment International*, 115(March), 312–324. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2018.03.044>

81. Martínez-Austria, P. F. (13 de Noviembre de 2013). *Redalyc*. Obtenido de Redalyc: [/www.redalyc.org/articulo.oa?id=3535/353531985](http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=3535/353531985)
82. Mendoza, M. (2011). El formidable reto de la resistencia bacteriana a los antibióticos. *Rev. Fac Med.*, 18-27.
83. Mexicanos, C. d. (2016). *Cámara de diputados*. Obtenido de [http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/16\\_240316.pdf](http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/16_240316.pdf)
84. Mohammadali M., Davies J. (2018). Antimicrobial Resistance Genes and Wastewater Treatment. *Antimicrobial Resistance in Wastewater Treatment Processes, First Edition*. Vancouver, Canadá.
85. Mousset, E., Hao, W., Wei, L., Lim, S., Jarry, L., Wang, Z., Lefebvre, O. (2021). Cost comparison of advanced oxidation processes for wastewater treatment using accumulated oxygen-equivalent criteria. *Water Research*, 200,117234. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2021.117234>
86. Munoz, M., García-Muñoz, P., Pliego, G., De Pedro, Z. M., Zazo, J. A., Casas, J. A., & Rodríguez, J. J. (2014). Tratamiento de aguas residuales hospitalarias mediante el proceso Fenton.
87. Navarro Amado, Herrera Jorge, Marrugo José, Bayona Josep, Morales Lorenzo (2014). Microcontaminantes orgánicos en los ríos de México: el caso del río Nexapa. Ecorfan, Valle de Santiago, Guanajuato. Recuperado de: [https://www.ecorfan.org/handbooks/Ciencias%20de%20la%20Ingenieria%20y%20Tecnologia%20T-IV/Articulo\\_7.pdf](https://www.ecorfan.org/handbooks/Ciencias%20de%20la%20Ingenieria%20y%20Tecnologia%20T-IV/Articulo_7.pdf)
88. Navarro Frometa Enrique A. (14 de Agosto de 2021). Estudio y solución de problemas ambientales relacionados con las aguas superficiales y el aire en la subcuenca del río Nexapa. [Archivo PDF] Nombre de la página: <http://navarrof.orgfree.com/Investigacion>
89. Nishanth T., Dionysios D. D. and Suresh C. P., Heterogeneous Fenton Catalysts: A Review of Recent Advances, *Journal of Hazardous Materials*, (2020) <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.124082>
90. Novo, A., André, S., Viana, P., Nunes, O. C., & Manaia, C. M. (2013). Antibiotic resistance, Antimicrobial residues and bacterial community composition in urban wastewater. *Water Research*, 47(5), 1875–1887. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2013.01.010>

91. Noyola, A., Morgan, J., & Guereca, L. (2013). *Selección de tecnologías para el tratamiento de aguas residuales municipales*. Ciudad de México, México. Universidad Nacional Autónoma de México. Recuperado de: <http://es.slideshare.net/EdwinMamaniVilcapaza/seleccion-de-tecnologias-para-el-tratamiento-de-aguas-residuales-municipales>
92. O'Dowd Kris, Pillai Suresh (2020). Photo-Fenton disinfection at near neutral pH: Process parameter optimization and recent Advances. *Journal of Environmental Chemical Engineering* 8. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.104063>
93. OMS. (2016). *Plan de acción mundial sobre la resistencia a los antimicrobianos*. Suiza: Minimum graphics.
94. O'Neill, J. (2016). *Tackling drug-resistant infections globally: final report and recommendations*. UK.
95. ONU HABITAT (2018). Índice básico de las ciudades prósperas: Izúcar de Matamoros, Puebla, México. México. Autor: ONU hábitat. Recuperado de: [http://70.35.196.242/onuhabitatmexico/cpi/2018/21085\\_Iz%C3%Bacar\\_de\\_Matamoros.pdf](http://70.35.196.242/onuhabitatmexico/cpi/2018/21085_Iz%C3%Bacar_de_Matamoros.pdf)
96. Paredes Vendrell Carolina (2021, febrero). Resistencia antimicrobiana, ¿La nueva pandemia? *Contexto UDLAP*. Recuperado de: <https://contexto.udlap.mx/>
97. Partnership, G. W. (2009). *Manual para la gestión integrada de recursos hídricos en cuencas*. Francia: Scriptoria.
98. Pastor Seller, Enrique. (2007). La participación ciudadana en los servicios sociales municipales de la región de Murcia. Universidad de Murcia, España. Recuperado de: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=5923>
99. Pérez-Castresana Gabriela (2017, julio). Un río que enferma. *Nexos*. Recuperado de: <https://www.nexos.com.mx/?p=32760>
100. PNUMA. (2017). Resistencia a los antimicrobianos: investigar la dimensión ambiental. *FRONTERAS*, 12-20.
101. Ramos, C. A. (2015). Los paradigmas de la investigación científica. *Av. psicol* 23(1), 9-17.
102. Rodríguez Peña M, Barrera Díaz C.E. (2020). *Procesos de oxidación avanzada en el tratamiento de agua*. Toluca, Estado de México: Publicaciones UAEM. Recuperado

de: <https://ri.uaemex.mx/bitstream/handle/20.500.11799/109964/capitulo7-fotocatalisis-vis.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

103. Rosha P., Kumar S., Ibrahim H. (2021). Thermodynamic equilibrium analysis of oxy-dry reforming of biogas with CO<sub>2</sub> sequestration using Aspen HYSYS 2021. *Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering*. 16 (5) e2683 , DOI10.1002/apj.2683
104. Sabri, N., Schmitt, H., Van der Zaan, B., Gerritsen, H., Zuidema, T., & Rijnaarts, H. (2018). Prevalence of antibiotics and antibiotic resistance genes in a wastewater effluent-receiving river in Netherlands. *Journal of Environmental Chemical Engineering*.
105. Salas Rodríguez Juan José, Pidre Bocado Juan Ramón, Cuenca Fernández Inmaculada (2007). Manual de tecnologías no convencionales para la depuración de aguas residuales Centro de las Nuevas tecnologías del Agua (CENTA), Andalucía, España.
106. Sampieri, H. R. (2014). *Metodología de la investigación 6ta edición*. Ciudad de México: Mc Graw Hill.
107. Sánchez-Huesca, R., Lerma, A., Guzmán-Saldaña, R. M. E., & Lerma, C. (2020). Prevalence of antibiotics prescription and assessment of prescribed daily dose in outpatients from México city. *Antibiotics*, 9(1), 1–11. <https://doi.org/10.3390/ANTIBIOTICS9010038>
108. Sánchez Ruiz Concepción (2015). Reacciones Fenton. Universidad de la Coruña. Inditex. España.
109. Secretaría de la Convención de Ramsar. (2010). *Manejo de cuencas hidrográficas: Integración de la conservación y del uso racional de los humedales en el manejo de las cuencas hidrográficas*. Gland, Suiza.
110. Secretaría de Agricultura, Ganadería y Desarrollo Rural (SADER). Norma Oficial Mexicana NOM-040-ZOO-1995, publicado en el D.O.F el 14 de agosto de 1996.
111. Secretaría de Agricultura, Ganadería y Desarrollo Rural (SADER). Norma Oficial Mexicana NOM-064-2000, publicado en el D.O.F el 27 de enero de 2003.
112. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2008). [www.semarnat.gob.mx](http://www.semarnat.gob.mx). Obtenido de: [https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe\\_12/pdf/Cap6\\_agua.pdf](https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe_12/pdf/Cap6_agua.pdf)

113. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2012). *Estrategia para el desarrollo de indicadores, Frontera 2012, Programa Ambiental México-Estados Unidos*. Obtenido de Gobierno de México: [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/182372/Estrategia\\_Desarrollo\\_Indicadores\\_esp.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/182372/Estrategia_Desarrollo_Indicadores_esp.pdf)
114. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2015). *Inventario Nacional de Plantas Municipales de Potabilización y de Tratamiento de Aguas Residuales en Operación*. Ciudad de México.
115. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-2021, publicado en el D.O.F. el 11 de marzo de 2022.
116. Secretaría de Salud (SS). Norma Oficial Mexicana NOM-072-SSA1-2012, publicado en el D.O.F. el 21 de noviembre del 2012.
117. Secretaría de Salud (SS). Norma Oficial Mexicana NOM-059-SSA1-2015, publicado en el D.O.F. el 5 de febrero de 2016.
118. Segura, Y., Cruz del Álamo, A., Muñoz, M., Álvarez-Torrellas, S., García, J., Casas, J. A., De Pedro, Z. M., & Martínez, F. (2021). A comparative study among catalytic wet air oxidation, Fenton, and Photo-Fenton technologies for the on-site treatment of hospital wastewater. *Journal of Environmental Management*, 290(April). <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112624>
119. Selvam, A., Xu, D., Zhao, Z., & Wong, W. J. (2012). Fate of tetracycline, sulfonamide and fluoroquinolone resistance genes and the changes in bacterial diversity during composting of swine manure. *Bioresource Technology*, 383-390
120. Shejale, K. P., Shejale, K. P., Yadav, D., Patil, H., Patil, H., Saxena, S., Saxena, S., Shukla, S., & Shukla, S. (2020). Evaluation of techniques for the remediation of antibiotic-contaminated water using activated carbon. *Molecular Systems Design and Engineering*, 5(4), 743–756. <https://doi.org/10.1039/c9me00167k>
121. Singer, A. C., Shaw, H., Rhodes, V., & Hart, A. (2016). Review of antimicrobial resistance in the environment and its relevance to environmental regulators. *Frontiers in Microbiology*, 7(NOV), 1–22. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2016.01728>
122. SOSAPAMIM. (15 de mayo de 2021). SOSAPAMIM Sistema Operador de Agua Potable y Alcantarillado del Municipio de Izúcar de Matamoros. Recuperado el 5 de mayo de 2021 de <https://www.sosapamim.gob.mx/>

123. Steinfeld H., Gerber P., Wassenaar T., Castel V., Rosales M., De Haan C, *La larga sombra del Ganado*, FAO 2009, 160.
124. Stirling Maria Clara, De Mendoca Neto Rondon P., Pires Giovanna F.F., Beccalli Vilela Pámela, Amorim Camila C. (2021). Combat of Antimicrobial resistance in municipal wastewater Treatment plan effluent via solar advanced oxidation processes: achievements and perspectives. *Science of the Total Environmental*. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147448>
125. Terán, M. C. (2016). *Estudio de la aplicación de procesos de oxidación avanzada a aguas contaminadas*. Catalunya.
126. Thambiyapillai S., Ramanujam M. (2021). An experimental investigation and aspen hysys simulation of waste polystyrene catalytic cracking process for the gasoline fuel production. *International Journal of Renewable Energy Development*. 10 (4): 891-900, DOI10.14710/IJRED.2021.33817
127. Thomas, N., Dionysiou, D. D., & Pillai, S. C. (2021). Heterogeneous Fenton catalysts: A review of recent advances. *Journal of Hazardous Materials*, 404, 124082. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.124082>
128. Universidad Nacional Autónoma de México (2019). Plan Universitario de Control de la Resistencia Antimicrobiana (PUCRA). Segundo Reporte de los Hospitales de la Red de PUCRA: Resistencia antimicrobiana y consumo de antimicrobianos. Ciudad de México, noviembre 2019. Recuperado de: [www.puis.unam.mx](http://www.puis.unam.mx)
129. Van Boeckel, T. P., Gandra, S., Ashok, A., Caudron, Q., Grenfell, B. T., Levin, S. A., & Laxminarayan, R. (2014). Global antibiotic consumption 2000 to 2010: An analysis of national pharmaceutical sales data. *The Lancet Infectious Diseases*, 14(8), 742–750. [https://doi.org/10.1016/S1473-3099\(14\)70780-7](https://doi.org/10.1016/S1473-3099(14)70780-7)
130. Wang J, Man Y, Ruan W, Fung-yee Tam N, Tao R, Yin L, Dai Y, Tai Y(2020). The effect of rhizosphere and the plant species on the degradation of sulfonamides in model constructed wetlands treating synthetic domestic wastewater. *Chemosphere* Vol. 288. DOI:10.1016/j.chemosphere.2021.132487.
131. Wang M., Chen H., Liu S., Xiao Lin (2020)., Removal of pathogen and antibiotic resistance genes from waste activated sludge by different pre-treatment approaches, *Science of the Total Environment*. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143014>
132. Xu Min, Wu Changyong, Zhou Yuexi. (2019) Advancements in the Fenton Process for Wastewater Treatment. *IntechOpen*. DOI:10.5772/intechopen.90256

133. Ye, C., Shi, J., Zhang, X., Qin, L., Jiang, Z., Wang, J., Li, Y., & Liu, B. (2021). Occurrence and bioaccumulation of sulfonamide antibiotics in different fish species from Hangbu-Fengle River, Southeast China. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(32), 44111–44123. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-13850-5>
134. Zhang Yingying, Zhuang Yai, Geng Jinju, Ren Hongiang, Xu Ke, Ding Lili (2016). Reduction of antibiotic resistance genes in municipal wastewater effluent by advanced oxidation processes. *Science of the Total Environment* 550. Pp 184-191. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.01.078>
135. Zaied, B. K., Rashid, M., Nasrullah, M., Zularisam, A. W., Pant, D., & Singh, L. (2020). A comprehensive review on contaminants removal from pharmaceutical wastewater by electrocoagulation process. *Science of the Total Environment*, 726, 138095. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138095>
136. Zhang, Z., Zhang, Q., Lu, T., Zhang, J., Sun, L., Hu, B., Hu, J., Peñuelas, J., Zhu, L., & Qian, H. (2021). Residual chlorine disrupts the microbial communities and spreads antibiotic resistance in freshwater. *Journal of Hazardous Materials*, 423(August 2021). <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.127152>
137. Zheng, Y., Fan, L., Dong, Y., Li D., Zhao L., Yuan X., Wang L., Zhao S. (2021) Determination of Sulfonamide Residues in Livestock and Poultry Manure Using Carbon Nanotube Extraction Combined with UPLC-MS/MS. *Food Anal. Methods* 14, 641–652 [doi.org/10.1007/s12161-020-01910-4](https://doi.org/10.1007/s12161-020-01910-4)
138. Zuo, R., Liu, X., Zhang, Q., Wang, J., Yang, J., Teng, Y., Chen, X., & Zhai, Y. (2021). Sulfonamide antibiotics in groundwater and their migration in the vadose zone: A case in a drinking water resource. *Ecological Engineering*, 162(February 2020), 106175. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2021.106175>