



# Benemérita Universidad Autónoma de Puebla



---

Facultad de Ingeniería Química.

Colegio de Ingeniería Ambiental.

---

***Degradación de ciprofloxacino mediante un  
sistema secuencial Fotocatálisis -  
Microbiológico.***

---

TESIS PROFESIONAL.

Para obtener el grado de licenciatura de:  
INGENIERÍA AMBIENTAL.

Presenta:

Xarol Belen Mora Hernández.

Director de Tesis

Dr. José Carlos Mendoza Hernández.

Codirector de Tesis

Dra. Gabriela Pérez Osorio

Febrero 2025

## **AGRADECIMIENTOS**

*A Dios mi creador,  
A mi padre por sacrificio y esfuerzo,  
A mi madre por comprensión y cariño,  
A mi hermano por nunca dudar de mí,  
A Gerardo por sabiduría y motivación,  
A mi pinkie por compañía,  
Y a cada una de las personas que  
fueron partícipes de este proceso y de mi  
vida universitaria.*

# Índice

|                                                                                 |    |
|---------------------------------------------------------------------------------|----|
| Índice de fotografías .....                                                     | 5  |
| Índice de gráficos.....                                                         | 5  |
| Índice de ilustraciones .....                                                   | 5  |
| Índice de tablas .....                                                          | 5  |
| Introducción .....                                                              | 7  |
| Planteamiento del problema .....                                                | 8  |
| Justificación .....                                                             | 10 |
| Hipótesis.....                                                                  | 11 |
| Objetivos .....                                                                 | 12 |
| Objetivo general .....                                                          | 12 |
| Objetivos específicos .....                                                     | 12 |
| CAPITULO 1. ANTECEDENTES .....                                                  | 13 |
| Contaminación ambiental .....                                                   | 13 |
| Contaminación del agua.....                                                     | 13 |
| Contaminantes emergentes .....                                                  | 13 |
| Antibióticos .....                                                              | 14 |
| Quinolonas.....                                                                 | 18 |
| Tecnologías para el tratamiento de contaminantes emergentes.....                | 20 |
| Procesos de oxidación avanzada (POA) .....                                      | 22 |
| Biorremediación .....                                                           | 23 |
| Mecanismos de degradación propuestos para la degradación de CIP .....           | 24 |
| CAPÍTULO 2. METODOLOGÍA .....                                                   | 27 |
| Fotocatálisis .....                                                             | 27 |
| Preparación de las muestras .....                                               | 27 |
| Fotolisis .....                                                                 | 27 |
| Sistema de fotocatálisis .....                                                  | 27 |
| Análisis espectrofotométrico .....                                              | 28 |
| Proceso microbiológico .....                                                    | 29 |
| Recolección de muestras.....                                                    | 29 |
| Aislamiento de poblaciones microbianas .....                                    | 30 |
| Pruebas de degradación preliminares y análisis espectrofotométrico uv-vis ..... | 31 |
| Formación de consorcios .....                                                   | 32 |

|                                                                                                          |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Identificación microbiana .....                                                                          | 32 |
| Integración del sistema fotocátalisis-microbiológico y determinación de la cinética de la reacción. .... | 32 |
| Prueba de toxicidad.....                                                                                 | 33 |
| CAPÍTULO 3. DISCUSIÓN DE RESULTADOS .....                                                                | 35 |
| Fotocátalisis .....                                                                                      | 35 |
| Sistema de fotocátalisis y análisis espectrofotométrico. ....                                            | 35 |
| Proceso microbiológico .....                                                                             | 36 |
| Aislamiento de cepas bacterianas .....                                                                   | 37 |
| Pruebas de degradación preliminares y análisis espectrofotométrico.....                                  | 37 |
| Formación de consorcios .....                                                                            | 40 |
| Identificación microbiana .....                                                                          | 40 |
| Integración del sistema fotocátalisis-microbiológico y determinación de la cinética de la reacción. .... | 41 |
| Prueba de toxicidad .....                                                                                | 44 |
| CONCLUSIONES .....                                                                                       | 46 |
| Anexo 1. Preparación de MMM.....                                                                         | 48 |
| Anexo 2. Preparación de caldo Luria Bertani (LB).....                                                    | 48 |
| Anexo 3. Curvas de calibración.....                                                                      | 49 |
| BIBLIOGRAFÍA .....                                                                                       | 51 |

## Índice de fotografías

|                                                            |    |
|------------------------------------------------------------|----|
| Fotografía 1. Sistema usado para fotocátalisis.....        | 28 |
| Fotografía 2. Aislamiento de poblaciones microbianas. .... | 31 |

## Índice de gráficos

|                                                                                                                                 |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Gráfico 1. Espectro UV-Vis de la degradación fotocatalítica de CIP con $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$<br>(elaboración propia)      | 35 |
| Gráfico 2. Espectro UV-Vis de las 5 cepas con mayor degradación de CIP a 25 ppm en<br>MMM.                                      | 39 |
| Gráfico 3. Espectro UV-Vis de las 5 cepas con mayor degradación de CIP en MMM + S.                                              | 39 |
| Gráfico 4. Degradación de CIP por el sistema fotocátalisis-microbiológico.                                                      | 43 |
| Gráfico 5. Curva de calibración para CIP en medio acuoso de 10 a 50 ppm (elaboración<br>propia).                                | 49 |
| Gráfico 6. Curva de calibración para CIP) en medio acuoso obtenida en esta investigación<br>(elaboración propia).               | 49 |
| Gráfico 7. Curva de calibración para CIP en MMM obtenida en esta investigación<br>(elaboración propia).                         | 50 |
| Gráfico 8. Curva de calibración para CIP en MMM adicionado con sacarosa obtenida en<br>esta investigación (elaboración propia). | 50 |

## Índice de ilustraciones

|                                                                                                                                                             |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Ilustración 1. Estructura química del CIP.....                                                                                                              | 19 |
| Ilustración 2. Posible vía bioquímica de degradación de CIP (Feng et al., 2019).....                                                                        | 25 |
| Ilustración 3. Rutas de fotodegradación posibles para CIP usando como fotocatalizador<br>nanopartículas de CTF- $\text{TiO}_2$ (Oyegbeda et al., 2024)..... | 26 |
| Ilustración 4. Ubicación de donde se tomaron las muestras de aguas residuales<br>(elaboración propia).....                                                  | 30 |

## Índice de tablas

|                                                                                                       |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabla 1. Concentraciones de antibióticos en matrices ambientales de México (Meléndez et<br>al., 2020) | 16 |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|

|                                                                                                                                                                              |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabla 2. Propiedades fisicoquímicas y parámetros farmacocinéticos del CIP (Alós, 2009)                                                                                       | 19 |
| Tabla 3. Tecnologías para el tratamiento de contaminantes emergentes (elaboración propia)                                                                                    | 21 |
| Tabla 4 Degradación de CIP durante el proceso fotocatalítico con $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$                                                                                 | 36 |
| Tabla 5. Colonias aisladas (Mc= agar mac-conkey, N= agar nutritivo, K= agar King, HT=hospital Tetela, C= ciprofloxacino, L=levofloxacino, RA= río Atoyac, río Tetela)        | 37 |
| Tabla 6 Degradación de CIP en 10, 25 y 50 ppm en MMM y MMM con sacarosa.                                                                                                     | 38 |
| Tabla 7. Resultados e interpretación de pruebas bioquímicas                                                                                                                  | 40 |
| Tabla 8. Morfología colonial                                                                                                                                                 | 40 |
| Tabla 9 Degradación parcial del sistema microbiológico y degradación total de la integración del proceso fotocatalítico y microbiológico.                                    | 41 |
| Tabla 10. Coeficientes de correlación de la degradación por cada cepa y consorcios formados (elaboración propia).                                                            | 44 |
| Tabla 11 Parámetros evaluados en la germinación de Medicago Sativa ante su exposición con los residuos de agua tratada de CIP con un sistema fotocatalítico -microbiológico. | 44 |
| Tabla 12. Reactivos y proporciones para la preparación de medio mínimo mineral (MMM) en 1000 mL.                                                                             | 48 |
| Tabla 13. Reactivos y proporciones para la preparación de caldo LB en 1000 mL.                                                                                               | 48 |

# Introducción

El agua es un elemento abundante y necesario en la Tierra tanto en la subsistencia de los ecosistemas como en la vida humana, con el tiempo se ha vuelto un factor fundamental en la producción de todo proceso agrícola y casi todos los procesos industriales, por tal razón, es un recurso de gran importancia, sin embargo, el cambio climático, el crecimiento demográfico y el uso indiscriminado del agua ha provocado escasez en diversas poblaciones, cerca de 2000 millones de personas en el mundo tienen restringido el acceso al agua potable segura (World Bank, 2023), además gran proporción de las aguas residuales son vertidas en aguas superficiales, lo cual contribuye a la contaminación de este recurso provocando desequilibrio en los ecosistemas dulceacuícolas y marinos (SEMARNAT, 2014), ante este problema ha surgido como estrategia la reincorporación del agua residual, la cual consiste en el saneamiento del agua ya utilizada, eliminando los agentes contaminantes con el fin de reintegrarla de manera segura en actividades como riegos agrícolas, riego de áreas verdes, procesos industriales y de ser posible el agua puede ser de consumo humano (Veolia Water Technologies, 2023).

En la actualidad la contaminación antropogénica de las aguas residuales se ha venido tratado con métodos convencionales como la filtración, sedimentación y cloración por mencionar algunos, dichos métodos no son del todo efectivos para la potabilización de agua, debido al aumento de contaminantes, principalmente los denominados como “contaminantes emergentes” o microcontaminantes que al encontrarse en bajas concentraciones habían pasado por alto y hasta hace poco se demostró que se encuentran distribuidos en el medio ambiente, siendo detectados en fuentes de abastecimiento, aguas subterráneas y preocupantemente en agua potable (Becerril, 2009). Los contaminantes emergentes están constituidos por productos no clasificados anteriormente como los fármacos, productos de cuidado e higiene personal, surfactantes, retardantes de fuego, aditivos industriales, hormonas, pesticidas, drogas de abuso (SEMARNAT, 2024), que al no ser incorporados a las regulaciones existentes no se pueden controlar eficazmente.

La remoción de contaminantes emergentes presentes en el agua requiere de una combinación de tecnologías ya que cada método tiene sus ventajas y limitaciones. Según Zhang et al (2023), entre las tecnologías más destacadas que prometen degradar los contaminantes emergentes están los procesos de oxidación avanzada (fotocatálisis, ozonización, peróxido de hidrógeno y radiación UV), que formando radicales oxidantes fuertes ( $O_2$ ,  $SO_4$  y  $\cdot OH$ ) permiten la fractura de la estructura química de las sustancias orgánicas convirtiéndolos en moléculas de menor tamaño y con menor toxicidad, pero a veces se mineralizan completamente en  $CO_2$  y agua. La fotocatalisis es un proceso de oxidación avanzada eficiente en la degradación de fármacos, la complejidad de la estructura química conformada por anillos aromáticos y demás grupos funcionales permiten la absorción de radiación (Preethi, 2024). Por otra parte, la biorremediación consiste en usar agentes biológicos para transformar sustancias perjudiciales en otras menos tóxicas e inocuas resultando ser un proceso respetuoso con el medio ambiente al producir pocos residuos (Ding, Yu, Ren y Geng, 2024). El acoplamiento de los procesos de fotocatalisis y biorremediación podría unificar las ventajas de ambos y reducir notablemente la concentración de contaminantes emergentes en las aguas residuales.

## **Planteamiento del problema**

El agua es fundamental para el desarrollo de la vida en nuestro planeta, presente en las actividades de subsistencia del hombre como la agricultura, ganadería e industria, pero el uso indiscriminado de este recurso ha provocado que la escasez del agua sea un reto urgente por atender y, por si fuera poco, el 80% de las aguas residuales se vierten directamente en aguas superficiales sin tratarlas o reutilizarlas previamente (ONU, 2023), provocando desequilibrio en la vida de los seres vivos presentes en los cauces y demás ecosistemas acuáticos.

En general, las aguas residuales urbanas son muy similares de una zona a otra, contienen variedad de contaminantes, entre ellos los denominados contaminantes emergentes (fármacos, compuestos perfluorados, hormonas, drogas de abuso y productos de cuidado

e higiene personal) son llamados así porque se encuentran en pequeñas concentraciones, pero presentan persistencia, toxicidad y capacidad de bioacumulación (Reinoso, Serrano & Orellana, 2017).

En común, los contaminantes emergentes pueden alterar la expresión genética de las especies acuáticas provocando una disminución en la diversidad genética, puede ocurrir de manera directa con el agua contaminada o a través de la bioacumulación en las cadenas tróficas, en el caso de los productos farmacéuticos tienden a alterar el comportamiento reproductivo de algunas especies acuáticas, así también tienen efectos sobre la salud humana provocando alteraciones hormonales, resistencia a antibióticos y demás impactos a largo plazo (Li, Shen, Jiang, Xi, Li, 2024).

Dentro de la clasificación de contaminantes emergentes presentes en las aguas residuales encontramos los antibióticos, que son fármacos que han aumentado en los caudales de aguas residuales, debido a la preinscripción inadecuada y además a su uso no solo en humanos, sino también en el sector ganadero y acuícola, son compuestos que no son metabolizados en su totalidad y en consecuencia son excretados, en mayor medida a través de la orina, pero también por las heces y por tal razón en su mayoría llegan a aguas residuales (Martínez, Soto, & Lahora, 2020), el aprovechamiento de los fármacos en el cuerpo humano dependerá de múltiples factores como la vía de administración, absorción y metabolismo de cada individuo así como del tipo de fármaco, específicamente el ciprofloxacino (CIP) perteneciente al tipo de las fluoroquinolonas que se encuentran dentro de los tres tipos de antibióticos más consumidos, tiene una biodisponibilidad entre el 70 y 80%, es decir, el resto es excretada sin modificación por vía renal y, en menor grado, por vía fecal (AEMPS, 2020)

Además, tras la pandemia de COVID-19 trajo consigo un aumento en el consumo y preinscripción de antibióticos en hospitales y la población en general, pues de acuerdo con Hussein (2022) el consumo de antibióticos en hospitales durante el 2020 aumentó un 16,3% en comparación con el consumo en 2019.

Actualmente, los procesos en las plantas de tratamiento de aguas residuales no están adaptados para eliminar los contaminantes emergentes, por lo que son insuficientes para extraer los antibióticos, por lo que acaban presenten en los efluentes (Yang et al. 2017) incluso se han detectado contaminantes emergentes en agua potable, lo que implica una dificultad para predecir la alteración en ríos, lagos, mares y, sobre todo, los daños a la salud humana.

## Justificación

El saneamiento del agua es parte de uno de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), específicamente el número 6: "Garantizar la disponibilidad y la gestión sostenible del agua y el saneamiento para todos" (ODS, 2015), respecto a ello, existen diversos métodos aplicados al saneamiento del agua incorporados en las plantas de tratamiento de aguas residuales, entre ellos la remoción de sólidos pesados y partículas flotantes, como aceite y espumas, ablandamiento, entre otros, no obstante aunque se espera un saneamiento correcto para la reintegración del agua para uso doméstico o agrícola, los sistemas de tratamiento comunes no resultan tan eficientes para la remoción de contaminantes emergentes debido a la escasa regulación estricta y específica para estos compuestos (Bolong, Ismail, Salim & Matsuura, 2019).

Considerando esto, hay que implementar tecnologías integradas al tratamiento de las aguas residuales para facilitar la remoción de los contaminantes emergentes y evitar su propagación para salvaguardar la vida silvestre, mantener la salud y la resiliencia de los ecosistemas acuáticos.

La fotocatálisis heterogénea u oxidación foto catalítica es una alternativa tecnológica viable para garantizar el saneamiento de agua, que consiste en la degradación de contaminantes mediante luz solar y catalizadores para formar radicales hidroxilos y tener efecto oxidante sobre ellos (Garcés, Mejía & Santamaría, 2004). Para el caso del CIP, *Hassani et al. (2015)* investigaron su degradación utilizando como catalizador partículas de dióxido de titanio ( $\text{TiO}_2$ ) soportadas en montmorillonita (hidrosilicato de aluminio y magnesio), lograron una

degradación del 71% respecto a una concentración inicial de 5 ppm, en otra investigación por González et al. (2024) degradaron CIP entre 76 y 95 % usando como catalizador oro (Au) depositado en partículas de  $\text{TiO}_2$  (Au/ $\text{TiO}_2$ ) mediante fotocátalisis heterogénea, según lo anterior, la degradación de CIP mediante fotocátalisis heterogénea es posible.

Por otra parte, la biorremediación es una alternativa que se alinea al saneamiento del agua, debido a que al utilizar procesos naturales y el aprovechamiento de los microorganismos permite la remoción de contaminantes al utilizarlos como alimento y energía, de tal modo que es considerada como un tratamiento efectivo, económico y amigable con el ambiente (Garzón, Rodríguez & Hernández, 2017). En una investigación por Pan et al. (2017) describen la cepa *Thermus* sp aislada a partir de lodos de una fábrica de productos farmacéuticos, como un posible auxiliar para la biodegradación de fluoroquinolonas debido a que reportaron la degradación de CIP del 57% en condiciones de temperatura de 70°C y 6.5 de pH. Galindo et al. (2023) desarrollaron un sistema de degradación para CIP, iniciaron con un proceso de fotocátalisis usando luz UVC a 254 nm y  $\text{TiO}_2$  como catalizador en muestras acuosas a 10, 25 y 50 ppm de antibiótico, al finalizar el proceso las muestras residuales de degradación fueron enriquecidas con TSB (caldo de triptona y soya) y se inocularon con *Pleurotus ostreatus* dejando en incubación a 28°C durante 14 días y finalmente se obtuvo una degradación de 100, 68 y 51% para 10, 25 y 50 ppm respectivamente.

Cabe señalar que tanto el proceso fotocatalítico como el microbiológico pueden ser eficientes individualmente, sin embargo, se busca desarrollar un sistema aplicando fotocátalisis heterogénea como primer método para que mediante el ataque de radicales libres se generen intermediarios más simples y seguido de un proceso de biorremediación se logre una mineralización que permita abrir un panorama acerca de la degradación de antibióticos clasificados como contaminantes emergentes, específicamente CIP.

## Hipótesis

El acoplamiento de un sistema secuencial Fotocátalisis-Microbiológico permitirá la degradación de CIP presente en aguas sintéticas.

# Objetivos

## Objetivo general

Evaluar el acoplamiento de un sistema secuencial Fotocatálisis- Microbiológico para la degradación de CIP.

## Objetivos específicos

- Desarrollar pruebas de fotocatálisis heterogénea con  $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$  con una concentración de 25 ppm de CIP.
- Aislar microorganismos provenientes de aguas residuales que sean resistentes a antibióticos.
- Analizar el porcentaje de degradación del acoplamiento del sistema fotocatálisis seguido por la degradación microbiológica.
- Evaluar la toxicidad del agua tratada con *Medicago sativa* (alfalfa).

# **CAPITULO 1. ANTECEDENTES**

## **Contaminación ambiental**

De acuerdo con Segura & López (2003), se entiende como contaminante a toda materia o sustancia que al incorporarse o actuar con cualquier elemento natural (agua, suelo o atmosfera) altere o modifique su composición inicial derivado de sus compuestos químicos o biológicos.

## **Contaminación del agua**

El agua es conocida como el solvente universal, debido a su capacidad de disolver más sustancias que cualquier otro líquido, razón por el cual la hace vulnerable a que sustancias nocivas como químicos y microorganismos disminuyan su calidad o hasta se vuelva obsoleta para su uso humano. Las sustancias contaminantes pueden integrarse al agua por diversas fuentes; puede penetrar el agua directamente a través de vertidos legales e ilegales de industrias y domiciliarios o de plantas de tratamiento de aguas con desperfectos, de igual modo las condiciones ambientales como el viento y las tormentas pueden arrastrar basura y residuos plásticos a las vías fluviales, los contaminantes más frecuentes en el agua son productos químicos (metales pesados, fertilizantes, pesticidas, herbicidas, petróleo), biológicos (bacterias), físicos (sedimentos) y los contaminantes emergentes que son sustancias que no tenían clasificación anteriormente (National Geographic, 2010).

## **Contaminantes emergentes**

Se denomina contaminante emergente a toda sustancia natural o sintética previamente desconocida en el medio ambiente cuyos efectos aún no son del todo comprendidos, tanto que habían pasado desapercibidos durante años (IMTA, 2018), también son llamados “microcontaminantes” debido a que suelen encontrarse en bajas concentraciones ( $\mu\text{g/L}$  o  $\text{ng/L}$ ) y a pesar de ello pueden ocasionar efectos negativos sobre los seres vivos en general y tener repercusiones sobre el equilibrio de ecosistemas. Su presencia en el medio ambiente no es necesariamente nueva, pero no ha sido hasta las últimas décadas que han aumentado y ha sido posible su detección (Torres et al., 2023).

Dentro de estos contaminantes se incluyen fármacos, compuestos perfluorados, retardantes de fuego, hormonas, pesticidas, productos industriales, microplásticos, drogas de abuso y productos de cuidado e higiene personal, los cuales recientemente se les ha identificado que debido a sus propiedades pueden ser persistentes, tóxicos, bioacumulables y solubles con alto potencial para combinarse con otros contaminantes, ocasionando que sean perjudiciales para la salud humana y el medio ambiente (Reinoso, Serrano & Orellana, 2017). Entre los distintos compuestos que han sido clasificados como contaminantes emergentes, los fármacos presentan un desafío ambiental por el consumo continuo y en aumento en humanos y animales, los fármacos incluyen variedad de compuestos como hormonas, antibióticos, antiinflamatorios, analgésicos, entre otros, siendo los antibióticos compuestos que representan gran preocupación debido a que pueden contribuir a la propagación de la resistencia microbiana (Gonzalez, 2024).

## **Antibióticos**

Son un grupo de fármacos, agentes químicos de origen biológico o semisintético usados para tratar infecciones bacterianas en humanos y animales, el modo de acción es impidiendo la reproducción bacteriana permitiendo que el organismo sea capaz de eliminar y superar con mayor facilidad la infección (National Library of Medicine, 2021).

Los antibióticos pueden clasificarse en diversos grupos desde su origen hasta su mecanismo de acción, entre los grupos principales se encuentran: aminoglucósidos, betalactámicos (penicilinas, cefalosporinas), glicopéptidos, lincosamidas, quinolonas, macrólidos, sulfamidas, tetraciclinas y miscelánea (Esparza, 2008). De los cuales de acuerdo Sánchez et al., (2020) los grupos de antibióticos más prescritos a pacientes en la Ciudad de México fueron: quinolonas (28%), penicilinas (23%), cefalosporinas (17%), macrólidos (10%), lincosamidas (9%) y sulfonamidas (4%), de los cuales las quinolonas más prescritas fueron CIP (45%) y levofloxacino (34%), mientras que en penicilinas y fueron amoxicilina (38%) y ácido clavulánico (36%).

## Efectos ambientales

La presencia de antibióticos en matrices ambientales ha aumentado debido a la preinscripción inadecuada en humanos, animales domésticos y en el sector ganadero y acuícola como estimulantes de crecimiento, por lo que su liberación en aguas residuales, estiércol y lodos puede ser por producto no ocupado que es desechado de manera incorrecta y por excreciones ya que no son metabolizados en su totalidad, algunos pueden metabolizarse en un 90% pero otros solo hasta el 10%, esto dependerá de cada antibiótico y cada individuo, es por ello que se encuentran en agua residual urbana, industrial, hospitalaria, suelos agrícolas, así como aguas superficiales y subterráneas (Meléndez et al., 2020). En la *tabla 1* se presentan los antibióticos con sus respectivas concentraciones que se han monitoreado en distintas matrices ambientales dentro del territorio mexicano, en ella se puede apreciar que las concentraciones de los efluentes de las plantas de tratamiento con respecto a las aguas residuales son relativamente similares, esto en consecuencia de que plantas de tratamiento no eliminan por completo los antibióticos.

Los efectos ambientales pueden ser diversos según la matriz ambiental en la que se encuentran, estos efectos toxicológicos van a variar según el tipo de fármaco, tipo de especie, la concentración y el tiempo de exposición, pero sin duda el problema más reportado es la creciente resistencia bacteriana, por ejemplo; la tasa de resistencia a penicilina del *Streptococcus pneumoniae* (bacteria causante de neumonía y meningitis) es de alrededor de 55%, esto sucede porque las bacterias desarrollan mecanismos como mutaciones o producción de enzimas para sobrevivir en el antibiótico eliminarlas, en consecuencia, las infecciones se vuelven cada vez más difícil de tratarlas provocando alza en la tasa de mortalidad por infecciones sencillas (Dreser, 2008).

Aunado a la alteración bacteriana, existen estudios que demuestran que el aumento de ampicilina en las aguas residuales afecta el correcto funcionamiento en los reactores biológicos de las plantas de tratamiento, tanto anaerobios como aeróbicos. Al igual se ha reportado alteración en las comunidades bacterianas, por ejemplo, el CIP provoca toxicidad

en algas, bacterias y cianobacterias, influyendo en su crecimiento y reduciendo las poblaciones, (Meléndez et al., 2020).

El vertido de aguas residuales en aguas superficiales puede generar que los antibióticos se mezclen entre sí o generen subproductos, compuestos que pueden ser aún más tóxicos incluso si las concentraciones son bajas, estos productos pueden ser absorbidos por animales y causar envenenamiento como los antiinflamatorios, hasta cambios en el comportamiento reproductivo de ciertas especies acuáticas, sin embargo, es difícil predecir los efectos por la diversidad de contaminantes vertidos (González, 2021).

En común, el incremento de antibióticos en el ambiente provoca alteraciones en el equilibrio del ecosistema y puede influir en los ciclos biogeoquímicos y cadenas tróficas por las alteraciones en los organismos (Meléndez et al., 2020).

*Tabla 1. Concentraciones de antibióticos en matrices ambientales de México (Meléndez et al., 2020)*

| <i>Matriz ambiental</i>                                        | <i>Antibiótico</i> | <i>Concentración<br/>(ng/L)</i> |
|----------------------------------------------------------------|--------------------|---------------------------------|
| <i>Agua superficial y<br/>subterránea<br/>Aguas residuales</i> | Triclosán          | 16-19<br>1-345 34               |
|                                                                | Azitromicina       | 29.4-211                        |
|                                                                | Ciprofloxacina     | 23.7-2570                       |
|                                                                | Claritromicina     | 8.42-1180                       |
|                                                                | Cloxacilina        | 10-10.4                         |
|                                                                | Enrofloxacin       | 22.8-50                         |
|                                                                | Eritromicina       | 25.9-1140                       |
|                                                                | Lincomicina        | 17.6-3710                       |
|                                                                | Norfloxacina       | 193                             |
|                                                                | Ofloxacina         | 1.82-1120                       |
|                                                                | Oxacilina          | 348                             |
|                                                                | Sulfadiazina       | 3.45-332                        |
|                                                                | Sulfadimetoxina    | 0.56-1,13                       |
|                                                                | Sulfametazina      | 1.21-75,5                       |
|                                                                | Sulfametoxazo      | 5.2-6570                        |
|                                                                | Sulfanilamida      | 194-440                         |
|                                                                | Sulfatiazol        | 44.9-85                         |
|                                                                | Trimetoprima       | 19.3-1610                       |
|                                                                | Oxitetraciclina    | 23.5-225                        |
|                                                                | Tetraciclinas      | 45.9-51.1                       |
| <i>Agua tratada</i>                                            | Trimetoprima       | 395 37                          |

|                 |       |
|-----------------|-------|
| Tetraciclina    | 64900 |
| Céfalo          | 2300  |
| Cefadroxilo     | 4700  |
| Ampicilina      | 15500 |
| Tetraciclina    | EF    |
| Azitromicina    | 22    |
| Ciprofloxacina  | 65.8  |
| Claritromicina  | 166   |
| Norfloxacino    | < 0,1 |
| Ofloxacina      | 293   |
| Sulfadiazina    | 292   |
| Sulfadimetoxina | 6.66  |
| Sulfametoxazol  | 1,500 |
| Trimetoprima    | 123   |
| Oxitetraciclina | 20.2  |

## Regulaciones

A lo largo de la historia del ser humano y tras su desarrollo científico, industrial y económico, se ha visto en la necesidad de generar las “reglas del juego” con la finalidad de evitar la caída de este. De ahí la importancia de desarrollar regulatorias: normas, leyes, decretos y tratados en todo giro: salud, economía, derechos humanos y legislación ambiental, que surge ante los problemas ambientales generados.

En México la restricción sobre el uso adecuado de fármacos comenzó en 2010 con un acuerdo de la Comisión Federal para la Protección contra Riesgos Sanitarios (COFEPRIS) sobre la venta y dispensación de antibióticos, donde se estableció que los antibióticos solo se pueden administrar con receta médica original, por lo que, la venta sin receta médica esta penalizada, además, los establecimientos de venta deben de tener el registro de ventas y desechos, ya que anteriormente los antibióticos eran fármacos de venta libre, (DOF, 2010). La Ley General de Salud y la Ley Federal de Sanidad Animal prohíben usar antibióticos como promotores de crecimiento en animales destinados al consumo humano, además, la COFEPRIS controla y vigila la lista de antibióticos en la industria alimentaria y agrícola, pública y actualiza la lista de antibióticos sujetos a control (GOB, 2024).

No obstante, surgió la Estrategia Nacional contra la Resistencia a los Antimicrobianos, donde se establecen acciones que tienen como objetivo reducir el riesgo de que los microorganismos se vuelvan resistentes a los medicamentos antimicrobianos, entre ellas se establece el uso racional de antibióticos en humanos y animales, fomento en la vigilancia de resistencia antimicrobiana en hospitales y granjas, así como, promoción de campañas educativas para sensibilizar a la población (GOB, 2024).

En cuanto a regulaciones internacionales enfocadas en promover el uso racional de antibióticos son promovidas principalmente por la Organización Mundial de la Salud (OMS) y la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). La OMS ha desarrollado directrices para la prescripción de antibióticos, donde se incluye pautas para la elección, dosis, vía de administración y duración por tratamiento, de igual modo, establece que cada país miembro debe elaborar su plan de acción nacional alineado al plan propuesto por la misma organización (OMS, 2016). Por su parte, la FAO establece las directrices para regular el uso de antibióticos en animales destinados a consumo humano, entre las cuales se destacan: ayudar a desarrollar estrategias, brindar apoyo político e intercambiar conocimientos con la finalidad de reducir la resistencia a antimicrobianos (FAO, 2021).

## **Quinolonas**

Es un grupo de antibióticos de origen sintético, su mecanismo de acción se basa en la inhibición de la enzima topoisomerasa de tipo II (ADN-girasa) y de la topoisomerasa de tipo IV, las cuales son esenciales para la replicación del ADN bacteriano (Ortega & Soriano, 2000). Tienen una estructura base de dos anillos uno de tipo piridina y otro aromático, cuando hay una adición de un átomo flúor en la posición 6 se les conoce como fluoroquinolonas, que provoca un aumento en el espectro antimicrobiano debido a un aumento en la penetración celular (Esparza, 2008).

La clasificación dentro de este grupo está dada por generaciones de acuerdo con su espectro de acción; primera generación (ácido nalidíxico y ácido pipemídico) tienen efectos sobre bacterias gram negativos y muy poco efectivos en gram positivos por lo que su uso se

restringe a solo infecciones urinarias, segunda generación (CIP, norfloxacin y ofloxacin) aumentan los efectos sobre bacterias gram negativas incluyendo *Pseudomonas aeruginosa* que anteriormente era difícil tratar, tercera generación (levofloxacin, sparfloxacin) tienen mayor absorción y su espectro antimicrobiano aumenta en gram positivos, cuarta generación (moxifloxacin, trovafloxacin) son antibióticos efectivos en algunas bacterias anaerobias y mejor espectro de acción en Gram negativas, por lo que suelen ser útiles en el tratamiento de infecciones mixtas (Alós, 2009).

### Ciprofloxacino (CIP)

Es un antibiótico del grupo de las fluoroquinolonas, parte del grupo antiguo (2da generación), caracterizado por un espectro antimicrobiano en bacterias Gram negativas y Gram positivas, el mecanismo de acción se basa en la inhibición de la enzima topoisomerasa de tipo II (ADN-girasa) y de la topoisomerasa de tipo IV, esenciales para la replicación del ADN bacteriano (Ortega & Soriano, 2000).

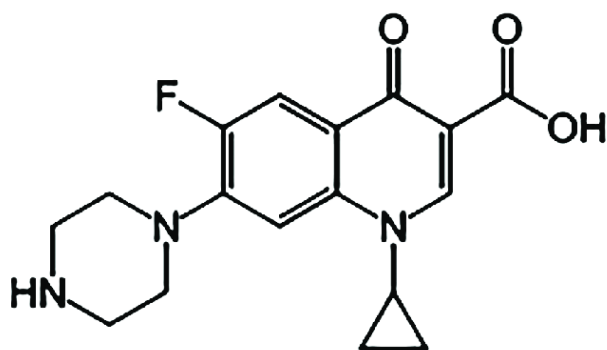


Ilustración 1. Estructura química del CIP.

Tabla 2. Propiedades fisicoquímicas y parámetros farmacocinéticos del CIP (Alós, 2009)

| Antecedentes               |                                                                                                                          |
|----------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Patente                    | Bayer 1983                                                                                                               |
| Lanzamiento                | Alemania en 1987                                                                                                         |
| Dato histórico             | En 2001 fue empleado contra la amenaza del bioterrorismo por ántrax ( <i>Bacillus anthracis</i> ) en los Estados Unidos. |
| Propiedades fisicoquímicas |                                                                                                                          |
| Formula Molecular          | C <sub>17</sub> H <sub>18</sub> FN <sub>3</sub> O <sub>3</sub>                                                           |

|                                                   |                                                                                                                              |
|---------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Denominación IUPAC                                | 1-cyclopropyl-6-fluoro-4-oxo-7-piperazin-1-ylquinoline-3-carboxylic acid                                                     |
| Numero CAS                                        | 85721-33-1                                                                                                                   |
| Masa molar (g/mol)                                | 331.3 mg                                                                                                                     |
| Aspecto físico                                    | Sólido cristalino blanco o blanco-amarillento                                                                                |
| Punto de fusión                                   | 255-257 °C                                                                                                                   |
| Solubilidad                                       | Moderadamente soluble en agua; más soluble en soluciones acidas.                                                             |
| Constante de disociación ácida (pK <sub>a</sub> ) | 6.76 para el grupo carboxilo; 3.64, 5.05 y 8.68 para el grupo amino.                                                         |
| Presión a vapor (mm Hg)                           | 8x10 <sup>-7</sup>                                                                                                           |
| Biodegradabilidad en agua(d <sup>-1</sup> )       | 0.277                                                                                                                        |
| Estereoquímica                                    | No presenta centros quirales.                                                                                                |
| Grupos funcionales                                | Ácido carboxílico (-COOH) y cetona (-C=O) en el núcleo de quinolona.<br>Grupo fluoro (-F)<br>Grupo piperazina<br>Ciclopropil |
| <b>Parámetros farmacocinéticos</b>                |                                                                                                                              |
| Dosis oral (mg)                                   | 500 mg                                                                                                                       |
| C <sub>max</sub> (mg/l) (h)                       | 2.5                                                                                                                          |
| t <sub>1/2</sub> (h)                              | 4                                                                                                                            |
| Biodisponibilidad (1/kg)                          | 70-75                                                                                                                        |
| Excreción renal (%)                               | 60-70                                                                                                                        |
| Metabolismo                                       | 20                                                                                                                           |

Específicamente el CIP se usa para tratar o prevenir ciertas infecciones causadas por bacterias como la neumonía; fiebre tifoidea; diarrea infecciosa; e infecciones de la piel, articulaciones, abdomen y próstata (MedlinePlus Medicinas, 2021), aunque es un fármaco de uso humano, se ha utilizado en animales pequeños para el tratamiento de infecciones en la piel, neumonía e infecciones de tejidos blandos (Papich, 2016). Así mismo debido al alza en el consumo de este tipo de fármacos se ha generado resistencia (especialmente a fluoroquinolonas de 1ra y 2da generación) en Enterobacterales, *P. aeruginosa*, *S. pneumoniae* y especies de *Neisseria* (Werth, 2022).

## Tecnologías para el tratamiento de contaminantes emergentes

En los últimos años se han desarrollado tecnologías prometedoras para ser integradas en las plantas de tratamiento de aguas residuales con la finalidad de tener una mayor eliminación de contaminantes emergentes, entre las más destacadas se encuentran; técnicas de membrana (osmosis inversa, microfiltración, nanofiltración y ultrafiltración), adsorción, procesos de oxidación avanzada, biorremediación y nanoremediación, entre otras tecnologías basadas en nanomateriales que aún están en desarrollo ya que debido a sus altos costos es difícil su demostración a gran escala (Sethuraman, 2024).

*Tabla 3. Tecnologías para el tratamiento de contaminantes emergentes (elaboración propia)*

| <b>Método</b>                                                                     | <b>Tecnología</b>              | <b>Características</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
|-----------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <i>Físico (utilizan barreras físicas para retener o eliminar el contaminante)</i> | Técnicas de membrana           | Se pueden adaptar al tipo de contaminante a retener al variar las características de filtrado como el tamaño del poro, la carga superficial, las membranas son capaces de atrapar partículas de alto peso molecular mientras permite el paso de partículas de menor tamaño como el agua (Sethuraman et al, 2024). |
|                                                                                   | Adsorción                      | A partir de materiales adsorbentes se atraen y retienen distintos contaminantes además evita la producción de subproductos debido a la variedad de adsorbentes disponibles con distintas capacidades de adsorción (Selim et al, 2024).                                                                            |
| <i>Químico (mineralización con compuestos químicos)</i>                           | Procesos de oxidación avanzada | Se basa en la utilización de productos químicos como oxidantes para fracturar compuestos orgánicos e inorgánicos, sin embargo, durante el proceso de oxidación pueden surgir subproductos con mayor toxicidad (Preethi, 2024)                                                                                     |

|                                                                                     |                 |                                                                                                                                        |
|-------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <i>Biológico (uso de microorganismos para degradar o metabolizar contaminantes)</i> | Biorremediación | La diversidad de microorganismos permite la mineralización de mezclas de contaminantes en casi cualquier parte del mundo (Cruz, 2007). |
|-------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

## Procesos de oxidación avanzada (POA)

Los procesos de oxidación avanzada son procesos fisicoquímicos que resultan útiles para la eliminación de contaminantes emergentes y demás compuestos orgánicos presentes en aguas residuales, implican la formación de radicales hidroxilos ( $\cdot\text{OH}$ ) altamente reactivos capaces de producir cambios en la estructura de los contaminantes, incluso las reacciones de oxidación logran una mineralización completa de compuestos orgánicos obteniendo como subproductos agua y dióxido de carbono (Garcés, Mejía & Santamaría, 2004).

Según el uso de radiaciones luminosas se pueden dividir en procesos fotoquímicos (consiste en la irradiación idealmente de luz solar) o no fotoquímicos (se basan en la utilización de energía no proveniente de la irradiación lumínica) (Ripoll, 2008). Estos procesos se pueden incorporar como postratamiento en las plantas tratadoras de agua para obtener una mayor purificación.

### Fotocatálisis

En los procesos de oxidación avanzada fotoquímicos actuales, la fotocatálisis es una tecnología innovadora para remediar aguas contaminadas, un fenómeno natural que combina la fotoquímica y la catálisis, dando paso a una reacción catalítica que emplea la radiación solar ultravioleta para absorber un material catalizador o sustrato para formar radicales hidroxilos que luego actuarán sobre los contaminantes produciendo un efecto oxidante ocasionando daños en su estructura permitiendo una degradación o mineralización (Garcés, Mejía & Santamaría, 2004).

El uso de la radiación solar la convierte en una tecnología rentable y sostenible a diferencia de otros tratamientos. Una ventaja de este proceso es que el catalizador se puede reciclar y no tiene efectos tóxicos sobre el ambiente (Preethi, 2024).

### Catalizador

Para el proceso de fotocátalisis las concentraciones de reactivos, la radiación y los catalizadores son los actores principales, el empleo de un material catalizador será el que experimentará una serie de reacciones produciendo especies reactivas de oxígeno ( $\cdot\text{OH}$ ) debido a la excitación de electrones que actuarán sobre el contaminante (Preethi, 2024).

### $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$

El dióxido de titanio ( $\text{TiO}_2$ ) es el catalizador más utilizado para la mineralización de componentes debido a que posee baja toxicidad y mayor estabilidad química (Wu, 2024), para el  $\text{TiO}_2$  la oxidación de contaminantes ocurre en su sitio reactivo por la acción de radicales  $\cdot\text{OH}$  que mineralizan a  $\text{CO}_2$  y  $\text{H}_2\text{O}$ , sin embargo, en los últimos años el dopaje con dióxido de silicio ( $\text{SiO}_2$ ), un mineral abundante que naturalmente se encuentra como cuarzo sobre la corteza terrestre (Mendoza et al, 2020). El  $\text{SiO}_2$  ha sido de gran estudio debido a su gran área superficial y estabilidad térmica, es un material que funciona como soporte de distintos metales u otros elementos para formar catalizadores activos, además se ha demostrado que la combinación de  $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$  muestra aun mayor eficiencia en la mineralización que por sí solo el  $\text{TiO}_2$  (Preethi, 2024).

## Biorremediación

La biorremediación es una técnica de descontaminación, muy utilizada por su alta efectividad, consiste en usar agentes biológicos (plantas, hongos, bacterias, etc.) para transformar sustancias perjudiciales en otras menos tóxicas e inocuas para el medio ambiente y la salud humana, uno de los sistemas más utilizados es el uso de microorganismos mediante la absorción de sustancias orgánicas que acumulan y utilizan como fuente de carbono necesarias para su crecimiento y energía para sus funciones metabólicas (Cruz, 2007).

Algunos de los géneros bacterianos más estudiados para sistemas de biorremediación son *Pseudomonas*, *Bacillus*, *Acinetobacter*, *Serratia* y *Proteus*, debido a su capacidad de producir biosurfactantes aumentan la biodisponibilidad de los contaminantes en el suelo o agua para su degradación (Castillo et al, 2020)

### **Técnicas de biorremediación**

De acuerdo con el lugar donde se aplicará la biorremediación se puede clasificar en *ex situ* e *in situ*, es decir, se dice que es *ex situ* cuando la parte contaminada es extraída del sitio original y el tratamiento de remediación se realiza en otro lugar, algunos ejemplos de esta técnica son: biorreactores, biopila, biofiltros y tratamientos en fase sólida. Por otra parte, cuando la remediación se realiza en el sitio contaminado es una biorremediación *in situ*, entre las técnicas utilizadas son: bioventilación, biosparging bioestimulación, bioaumentación, fitorremediación y esta última puede ser en ambientes controlados por lo que también se puede clasificar en *ex situ* (Hussain et al., 2021).

### **Bioaumentación**

Es la adición de microorganismos exógenos específicos modificados genéticamente o en estado natural en zonas a remediar, esta técnica se utiliza cuando las poblaciones autóctonas de microorganismos son incapaces de degradar el contaminante de interés. En la mayoría de los casos se utilizan consorcios microbianos para aumentar la eficiencia de degradación (Kuppan et al., 2024).

### **Consorcios microbianos**

Es la integración de diversas cepas microbianas que interactúan de manera complementaria con la finalidad de aumentar el porcentaje de degradación de contaminantes complejos y disminuyendo los tiempos habituales de remediación (Kuppan et al., 2024).

## **Mecanismos de degradación propuestos para la degradación de CIP**

Feng et al., (2019) propusieron una posible vía bioquímica de degradación de CIP mediante un sistema biológico usando un consorcio el cual estaba compuesto principalmente por

*Achromobacter*, *Bacillus*, *Lactococcus*, *Ochrobactrum* y *Enterococcus* otras 5 especies en menor proporción. El mecanismo se propuso a partir del análisis por cromatografía líquida de alto rendimiento- espectrometría de masas en tándem (HPLC-MS) que mostró cuatro picos cromatográficos desconocidos después de 7 días y 14 días de incubación, Sin embargo, los picos e intermediarios de degradación desaparecieron después de 30 días de inoculación, demostrando una posible degradación completa en formas químicas inofensivas incluyendo  $F^-$ ,  $CO_2$ ,  $H_2O$ ,  $NH_4^+$  y  $NO_3^-$ .

Por su parte, Oyegbeda et al., (2024) propusieron tres rutas de fotodegradación posibles para CIP usando como fotocatalizador nanopartículas de  $TiO_2$  intercaladas en triazina covalente (CTF), las rutas se basaron en productos de degradación identificados por espectrometría de masas. Las rutas incluyen hidroxilación de la fracción de quinolona para formar DP1 y DP2. (ruta A), reacciones paralelas coincidentes obteniendo DP3(se formó a partir de la desfluoración, descarboxilación e hidroxilación de la fracción de quinolona), DP4 (surge de la degradación de la fracción de piperazina y la hidroxilación) y DP5 (puede producirse por la escisión de la fracción de quinolona, los procesos de hidroxilación y desfluoración) (ruta B) y apertura de anillo (ruta C) la cual se propone que la estructura básica de la quinolona no estuvo intacta durante todo el proceso de degradación.

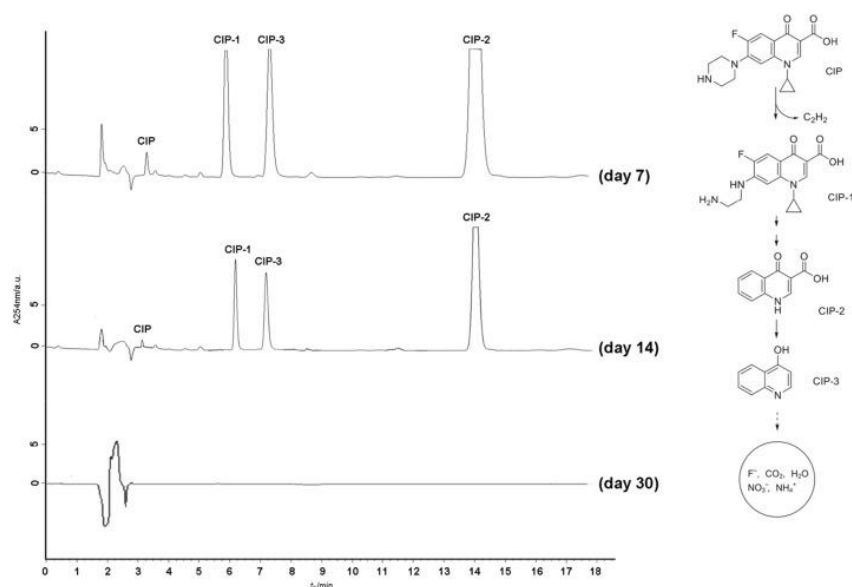


Ilustración 2. Posible vía bioquímica de degradación de CIP (Feng et al., 2019)

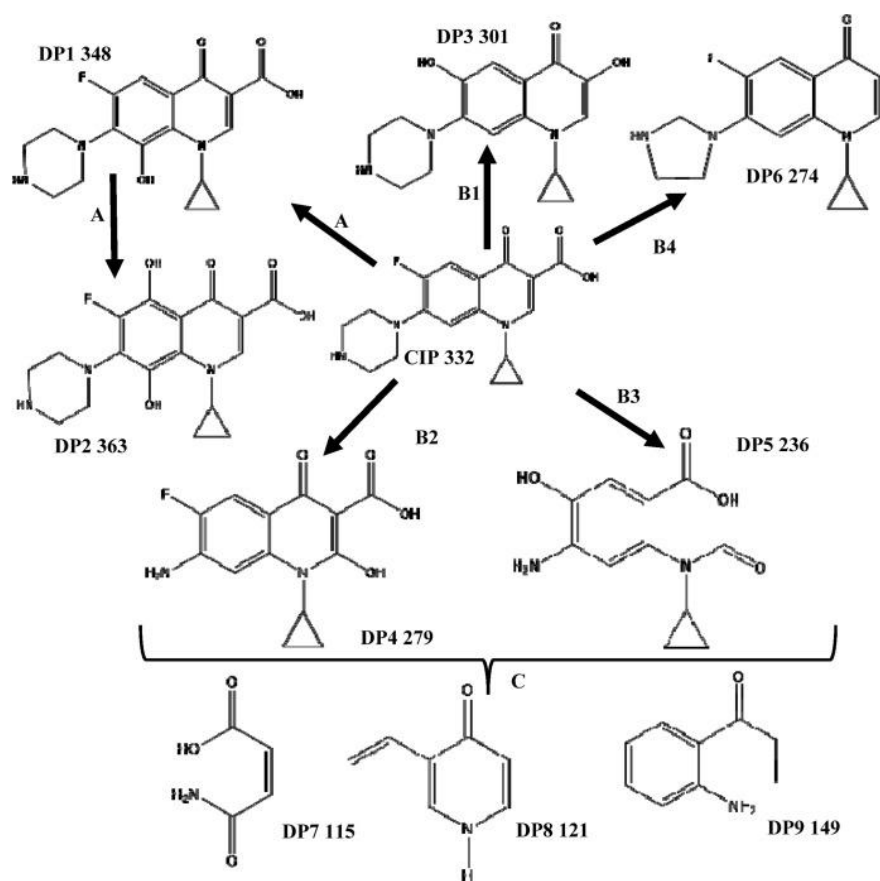


Ilustración 3. Rutas de fotodegradación posibles para CIP usando como fotocatalizador nanopartículas de CTF- TiO<sub>2</sub> (Oyegbeda et al., 2024)

## CAPÍTULO 2. METODOLOGÍA

### Fotocatálisis

#### Preparación de las muestras

Durante dos días se realizó un ensayo de degradación de CIP en medio acuoso, a una concentración de 25 ppm en 500 mL de agua destilada, el catalizador utilizado fue dióxido de titanio soportado en ( $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ ) a una concentración de 25 ppm. Se colocó un duplicado y se ocupó un testigo que consto de 500 mL de agua destilada a una concentración de 25 ppm de CIP.

#### Fotolisis

Las soluciones ya preparadas con catalizador y antibiótico se colocaron en matraces de bola de 1 litro y se dejaron durante 2 horas a prueba de oscuridad, sin incidencia de luz solar, pero con agitación continua. Se tomo una muestra inicial y otra después de las 2 horas para posteriormente medir su absorbancia por espectrofotometría uv-vis con la finalidad de detectar si existe alguna alteración, esta prueba de obscuridad solo se realizó el primer día del ensayo.

#### Sistema de fotocátalisis

Ya realizado la prueba de fotolisis los matraces fueron montados en un sistema como se muestra en la *fotografía 1* en agitación constante y en el segundo día se integró una bomba de aire para aumentar la oxigenación en el matraz, el sistema fue colocado en la Facultad de Ingeniería Química, con coordenadas 19°00'12.9"N y 98°12'13.0"W, se expuso en un horario de 10:00 am a 14:00 pm, tanto el primer día como el segundo ya que durante este periodo de tiempo se monitoreo el mayor nivel de radiación UV en la ciudad de Puebla, además el sitio donde se expuso no tenía interferencias con la luz solar por lo que la radiación fue continua durante las 8 horas. Para el análisis de degradación se tomó una muestra cada 2 horas las cuales se resguardaron sin incidencia de luz solar y posteriormente fueron leídas por espectroscopia uv-vis.



Fotografía 1. Sistema usado para fotocátalisis

## Análisis espectrofotométrico

Las muestras que se recuperaron durante el proceso fueron leídas por espectroscopia uv-vis, el análisis fue sobre las ondas de absorción que muestra el CIP, visiblemente con ayuda del espectro de absorbancia obtenido se detectó los cambios durante el transcurso del tiempo y para mayor precisión se realizó una curva de calibración con diluciones en concentraciones de 5, 10, 15, 20 y 25 ppm de contaminante considerando la longitud de onda con mayor absorbancia para CIP, de tal manera que fue posible cuantificar la concentración por interpolación sobre un ajuste de recta con los valores de la curva de calibración, mediante la siguiente formula:

$$C = \frac{y - b}{m} \quad (1)$$

C= Concentración del analito (ppm)

y= Absorbancia (nm)

b= Ordenada en el origen

m= Pendiente de la recta

Obtenida la concentración final fue posible calcular el porcentaje de degradación:

$$\%Degradacion = \left( \frac{C_0 - C}{C_0} \right) \times 100 \quad (2)$$

Donde;

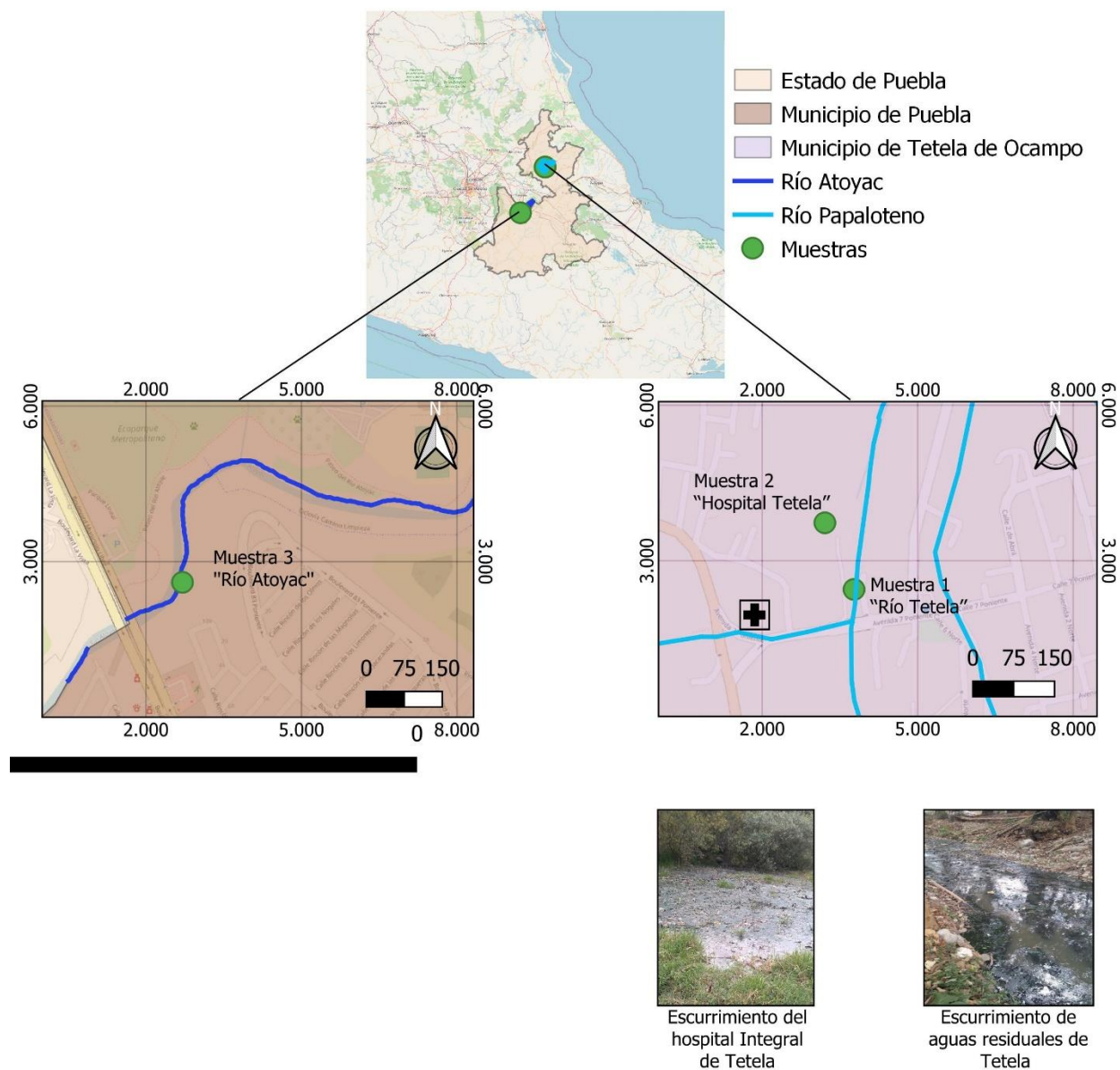
$C_0$  = Concentración inicial (ppm)

$C$  = Concentración final (ppm)

## **Proceso microbiológico**

### **Recolección de muestras**

Las muestras de agua se obtuvieron de 3 sitios distintos; 1 muestra del río Atoyac que recorre parte del estado de Tlaxcala y desciende al estado Puebla y 2 del río Papaloteno situado en el municipio de Tetela de Ocampo, Puebla. La muestra del río Atoyac se tomó en la ciudad de Puebla con coordenadas 19°01'09.0"N, 98°13'56.5"W, como se muestra en la ilustración 4. Las muestras del río Papaloteno se tomaron en las siguientes ubicaciones: una en el escurrimiento de las aguas hospitalarias con coordenadas 19°49'12.4"N, 97°48'44.7"W, a la cual se le asignó el nombre a la muestra como "hospital Tetela" y la otra a la altura de la cabecera municipal en coordenadas 19°49'07.4"N, 97°48'42.7"W, se le dio el nombre a la muestra de "río Tetela".

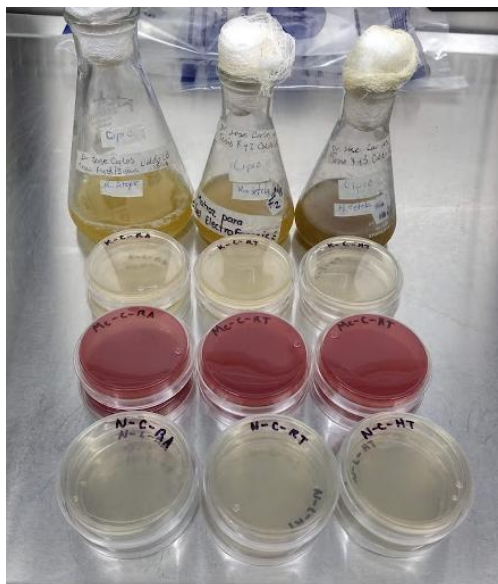


*Ilustración 4. Ubicación de donde se tomaron las muestras de aguas residuales (elaboración propia).*

## Aislamiento de poblaciones microbianas

En 6 matraces Erlenmeyer se les colocó 50 mL de caldo Luria Bertani (LB); a 3 matraces se les adicionó CIP a una concentración de 50 ppm y a los otros 3 matraces se les colocó levofloxacino (LEV) en igual concentración; de las muestras de agua se tomaron 5 mL y se distribuyeron de manera que cada muestra fue colocada en un matraz con CIP y LEV, se incubaron durante 48 horas a 30°C, la adición de antibiótico permitió el crecimiento

microbiano solo para bacterias resistentes a antibióticos. Del crecimiento microbiano obtenido se tomaron muestras que fueron sembradas en placa en agar nutritivo, agar king y agar mc conkey, se dejaron incubar durante 24 horas, y posteriormente se resembraron las colonias que visualmente eran distintas en un medio de cultivo nuevo para obtener un cultivo puro.



*Fotografía 2. Aislamiento de poblaciones microbianas.*

## **Pruebas de degradación preliminares y análisis espectrofotométrico uv-vis**

Con las bacterias aisladas se procedió a elegir las que tenían mayor porcentaje de degradación del antibiótico por lo cual se inocularon en concentraciones de 10, 25 y 50 ppm de CIP en 2 ensayos uno con medio mínimo mineral (MMM) adicionado con sacarosa al 0.3% y otro con solo MMM, las pruebas se realizaron en tubos eppendorf colocando 1.5 mL del medio y 200  $\mu$ L de cepa, se dejaron incubando durante un periodo de 7 días a 30 °C, pasado este tiempo se centrifugaron las muestras y solo se tomó el sobrenadante para realizar un análisis espectrofotométrico uv-vis.

Con la lectura del espectro de una solución con CIP a cualquier concentración en un rango de 200 a 800 nm se detectó el pico más alto en el espectro, el cual corresponde a la longitud de mayor absorbancia para el CIP, que fue de 273 nm y a partir de ella se realizó una curva

de calibración con valores de 10, 20, 30, 40 y 50 ppm y con la fórmula 1 se determinó la concentración final y con la fórmula 2 se pudo determinar el porcentaje de degradación.

Finalmente se seleccionaron las cepas que presentaron mayor porcentaje de degradación sobre el CIP.

## **Formación de consorcios**

Con las cepas seleccionadas se formaron 2 consorcios; el primero contenía todas las bacterias en mismas proporciones y en el segundo se concentraron las 3 cepas con mayor degradación en las pruebas preliminares.

## **Identificación microbiana**

Para la identificación de las cepas se realizaron pruebas bioquímicas por duplicado, las cuales fueron: *Agar Urea* (identificación de producción de enzima ureasa), *Caldo MR-VP* (capacidad de fermentación e indica pH bajo), *Agar Hierro de Kligler* (identifica si el microorganismo es capaz de metabolizar hidratos de carbono (glucosa y/o lactosa) y producción de ácido sulfhídrico), *Agar MIO* (Identificación de movilidad, ídolo y ornitina decarboxilasa), *Agar Lisina Hierro* (se basa en la descarboxilación y desaminación de la lisina y en la producción de ácido sulfhídrico), *Citrato de Simmons* (identifica la capacidad de usar citrato como única fuente de carbono) fueron incubadas a 30°C por 24 horas, con excepción de la prueba MR-VP que se incubaron por 48 horas. Además, se caracterizó la morfología colonial de cada sepa aislada.

## **Integración del sistema fotocátalisis-microbiológico y determinación de la cinética de la reacción.**

Partiendo de las muestras tratadas mediante el proceso de fotocátalisis, se inocularon 0.5 mL de las 5 bacterias seleccionadas y los 2 consorcios formados en 9.5 mL de muestra, a la cual se adiciono MMM a la solución acuosa. Se procedió a dejar incubando durante 4 días a 30°C y para la determinación de la cinética de la reacción se tomaron muestras de 3 mL por cada día las cuales fueron leídas por espectrofotometría uv-vis, para ello fue necesario

centrifugar las muestras a 10000 rpm durante 10 minutos y extraer solo el sobrenadante para la lectura.

La cinética de reacción se realizó con el fin de determinar el orden de la cinética de reacción, mediante los datos obtenidos de absorbancia se determinó la concentración de las muestras en el transcurso del tiempo y a partir de estos fue posible determinar el factor de correlación de los modelos de orden cero, uno y dos; de tal forma que, el modelo con el factor de correlación más cercano o igual a 1 corresponde al orden de la reacción que se lleva a cabo.

$$-\frac{dC}{dt} = k_0 \quad (3)$$

$$-\frac{dC}{dt} = k_1 C \quad (4)$$

$$-\frac{dC}{dt} = k_2 C^2 \quad (5)$$

Integrando las ecuaciones 4 y 5 desde C hasta  $C_0$  se obtiene:

$$C = C_0 - k_0 t \quad (6)$$

$$\ln C = \ln C_0 - k_1 t \quad (7)$$

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_0} + k_2 t \quad (8)$$

Donde

C= concentración del contaminante a un tiempo t.

$C_0$ = concentración inicial del antibiótico.

t= es el tiempo.

k= la constante cinética.

## Prueba de toxicidad

Con el agua obtenida al finalizar el sistema fotocátalisis- microbiológico, en placas Petri con papel filtro, en condiciones de esterilidad se depositaron 5 mL de cada muestra resultante y se colocaron 5 semillas de alfalfa por cada caja, además se usó un blanco con agua destilada, las cajas se cubrieron con papel aluminio para evitar la entrada de luz, la exposición duro 120 horas a una temperatura de 25°C. Pasado el tiempo se determinó el porcentaje de la germinación relativa de semillas (GRS), el crecimiento relativo de la radícula (CRR) y el índice de germinación (IG) de acuerdo con Rodríguez et al. (2014).

$$GRS(\%) = \frac{\text{Número de semillas germinadas con el residuo de la biodegradación}}{\text{Número de semillas germinadas en agua dura (blanco)}} \times 100 \quad (9)$$

$$CRR(\%) = \frac{\text{Longitud promedio de la radícula con el residuo de la biodegradación}}{\text{Longitud promedio de la radícula en agua dura (blanco)}} \times 100 \quad (10)$$

$$IG(\%) = \frac{GRS \times CRR}{100} \quad (11)$$

## CAPÍTULO 3. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

### Fotocatálisis

#### Sistema de fotocatálisis y análisis espectrofotométrico.

En el *grafico 1* se plasmaron los espectros de absorbancia de CIP durante el proceso fotocatalítico desde la muestra inicial cuando se disolvió el catalizador y el antibiótico en el agua hasta el día dos cuando se retiró el sistema de la radiación solar, a partir de este grafico es posible visualizar la disminución de absorbancia conforme el paso del tiempo, lo que indica una disminución en la concentración del antibiótico, es decir, el fotocatalizador  $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$  tiene gran impacto en la degradación de CIP.

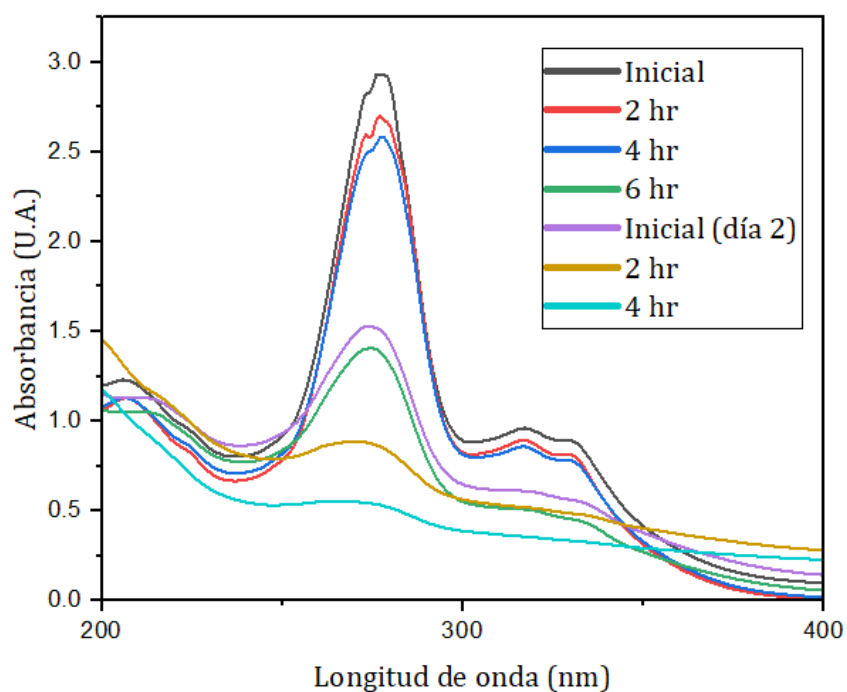


Gráfico 1. Espectro UV-Vis de la degradación fotocatalítica de CIP con  $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$  (elaboración propia)

La longitud de onda en la que CIP presento mayor absorbancia fue de 273 nm, a partir de esta se realizó la curva de calibración (*anexo 3*) y con el ajuste de recta se determinó la concentración y el porcentaje de degradación de cada alícuota tomada con el transcurso del tiempo como se muestra en la *tabla 4*. Se determinó que el porcentaje de degradación de CIP tras 8 horas de exposición a luz solar y usando como fotocatalizador  $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$  fue de

83.59%, de igual manera se ve una degradación mínima en el blanco esto en el día 2, con ello se dice que el antibiótico es una sustancia que se fotoxida por sí misma pero no con la misma velocidad que al usar un fotocatalizador.

La fotoxidación inicia a través de la absorción de luz por parte de CIP y conduce a la ruptura de enlaces o sustitución de flúor (desfluoración) o degradación en el anillo de piperazina (Wu et al., 2018). Por su parte, el fotocatalizador  $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$  mostro un resultado de degradación considerablemente alto, esto se debe a la sinergia entre  $\text{TiO}_2$  y  $\text{SiO}_2$  que mejora la actividad fotocatalítica, pues el  $\text{TiO}_2$  es un excelente fotocatalizador con alta actividad fotocatalítica pero la aglomeración de sus partículas trae como consecuencia una baja área superficial, es ahí donde el  $\text{SiO}_2$  funciona como soporte y aumenta la superficie permitiendo mayor contacto entre el fotocatalizador y el contaminante además su porosidad aumenta la adsorción (Mahanta et al., 2021).

Con respecto a los parámetros a considerar para mejorar la degradación es tomar en cuenta el tiempo de irradiación, el pH de la solución, pues en medios ácidos se puede ocasionar corrosión sobre el fotocatalizador y en medios básicos puede existir repulsión el fotocatalizador y el CIP (Kassahun et al., 2021), la dosis del fotocatalizador y la proporción de este, ya que el aumento de la proporción de  $\text{SiO}_2$  puede aumentar la adsorción de CIP, como lo describen Mahanta et al. (2021) donde en su estudio ocuparon una proporción de 1:5 y lograron obtener una degradación casi completa combinada en fase de fotólisis (88.6%), irradiación solar e irradiación UV (98%).

Tabla 4 Degradación de CIP durante el proceso fotocatalítico con  $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$

|                                                 | Inicial |       | 2 hr<br>(oscuridad) |       | 4 hr |       | 6 hr |       | Inicial (día 2) |       | 2 hr |       | 4 hr |       | %degradación |
|-------------------------------------------------|---------|-------|---------------------|-------|------|-------|------|-------|-----------------|-------|------|-------|------|-------|--------------|
|                                                 | abs     | []    | abs                 | []    | abs  | []    | abs  | []    | abs             | []    | abs  | []    | abs  | []    |              |
| Blanco                                          | 2.44    | 25.02 | 2.44                | 25.02 | 2.44 | 25.02 | 2.44 | 25.02 | 2.44            | 25.02 | 2.44 | 25.02 | 2.38 | 24.35 | 2.63         |
| $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$                     | 2.82    | 29.03 | 2.60                | 26.61 | 2.49 | 25.42 | 1.40 | 13.88 | 1.53            | 15.22 | 0.88 | 8.35  | 0.55 | 4.76  | 83.59        |
| Abs= absorbancia (U.A.), []=Concentración (ppm) |         |       |                     |       |      |       |      |       |                 |       |      |       |      |       |              |

## Proceso microbiológico

## Aislamiento de cepas bacterianas.

Inicialmente se lograron aislar 36 cepas (*tabla 5*) con resistencia a las fluoroquinolonas y para facilitar su manejo se les asigno un número y un nombre con las iniciales de donde fueron obtenidas, iniciando con el agar en donde se aislaron (agar mac conkey, agar nutritivo o agar king), el antibiótico que contenía el matraz (LEV o CIP), sitio del que provenía la muestra (rio Atoyac, hospital Tetela o rio Tetela) y finalmente un número que corresponde a la colonia de la que fueron aisladas.

| #  | Colonia   | #  | Colonia   |
|----|-----------|----|-----------|
| 1  | Mc-L-HT-1 | 20 | K-L-HT-3  |
| 2  | Mc-L-HT-2 | 21 | K-L-RA-1  |
| 3  | Mc-L-HT-3 | 22 | K-L-RA-2  |
| 4  | N-C-HT-1  | 23 | K-C-RA-1  |
| 5  | N-C-HT-2  | 24 | K-C-RA-2  |
| 6  | N-L-HT-1  | 25 | K-L-RT-1  |
| 7  | N-L-HT-2  | 26 | Mc-C-HT-1 |
| 8  | N-C-RA-1  | 27 | Mc-C-HT-2 |
| 9  | N-C-RA-2  | 28 | Mc-C-HT-3 |
| 10 | N-L-RA-1  | 29 | Mc-C-HT-5 |
| 11 | N-L-RA-2  | 30 | Mc-C-HT-6 |
| 12 | N-L-RA-3  | 31 | Mc-C-HT-7 |
| 13 | N-C-RT-1  | 32 | Mc-C-HT-8 |
| 14 | K-C-RT-1  | 33 | Mc-C-HT-9 |
| 15 | K-C-HT-2  | 34 | Mc-C-RT-4 |
| 16 | K-C-HT-3  | 35 | Mc-C-RT-1 |
| 17 | K-L-HT-1  | 36 | Mc-L-RT-1 |
| 18 | K-C-HT-1  | 37 | Mc-C-RA-1 |
| 19 | K-L-HT-2  | 38 | Mc-C-RT-3 |

*Tabla 5. Colonias aisladas (Mc= agar mac-conkey, N= agar nutritivo, K= agar King, HT=hospital Tetela, C= ciprofloxacino, L=levofloxacino, RA= rio Atoyac, rio Tetela)*

## Pruebas de degradación preliminares y análisis espectrofotométrico

El porcentaje de degradación de las 38 cepas aisladas permitió reducir el margen a 15 cepas que presentaron mayor porcentaje de degradación tanto con MMM solo y MMM+S, las cuales se muestran en la *tabla 5*. Con las 15 cepas se volvió a realizar una última prueba a

25 ppm de antibiótico en MMM solo y MMM+S, con ello se detectaron las 5 cepas que visiblemente disminuyeron la absorbancia, en el *grafico 2* se aprecia la degradación en MMM la cual es notoriamente mayor que la degradación con MMM+S que se muestra en el *grafico 3*, además en este último grafico es posible observar la existencia de nuevos picos de absorbancia que muestran la existencia de subproductos.

Tabla 6 Degradación de CIP en 10, 25 y 50 ppm en MMM y MMM con sacarosa.

| MMM + Sacarosa |               |          |          | MMM         |               |         |          |
|----------------|---------------|----------|----------|-------------|---------------|---------|----------|
| No.<br>Cepa    | % degradación |          |          | No.<br>Cepa | % degradación |         |          |
|                | 10 ppm        | 25 ppm   | 50 ppm   |             | 10 ppm        | 25 ppm  | 50 ppm   |
| <b>4</b>       | 27.27273      | 20       | 27.40741 | <b>13</b>   | 45.7142857    | 13.92   | 13.6129  |
| <b>5</b>       | 18.18182      | 10       | 18.51852 | <b>14</b>   | 2.85714286    | 17.9    | 11.35484 |
| <b>11</b>      | 25            | 9.090909 | 18.51852 | <b>20</b>   | 13.5714286    | 14.0770 | 8.129032 |
| <b>13</b>      | 31.81818      | 11.81818 | 38.51852 | <b>23</b>   | 17.1428571    | 16.818  | 9.419355 |
| <b>14</b>      | 27.27273      | 10.90909 | 17.40741 | <b>24</b>   | 13.5714286    | 11.5791 | 14.90323 |
| <b>20</b>      | 15.90909      | 8.181818 | 12.59259 | <b>28</b>   | 35            | 3.80226 | 7.806452 |
| <b>21</b>      | 13.63636      | 15.45455 | 9.62963  | <b>33</b>   | 31.4285714    | 0       | 8.774194 |
| <b>23</b>      | 15.90909      | 11.81818 | 19.25926 | <b>36</b>   | 20.7142857    | 10.809  | 11.03226 |
| <b>24</b>      | 34.09091      | 3.636364 | 12.22222 |             |               |         |          |
| <b>26</b>      | 27.27273      | 7.272727 | 15.55556 |             |               |         |          |
| <b>28</b>      | 15.90909      | 7.272727 | 11.85185 |             |               |         |          |
| <b>30</b>      | 38.63636      | 10.90909 | 10       |             |               |         |          |
| <b>33</b>      | 31.81818      | 2.727273 | 11.48148 |             |               |         |          |
| <b>34</b>      | 9.090909      | 3.636364 | 10.37037 |             |               |         |          |
| <b>36</b>      | 22.72727      | 8.181818 | 7.037037 |             |               |         |          |

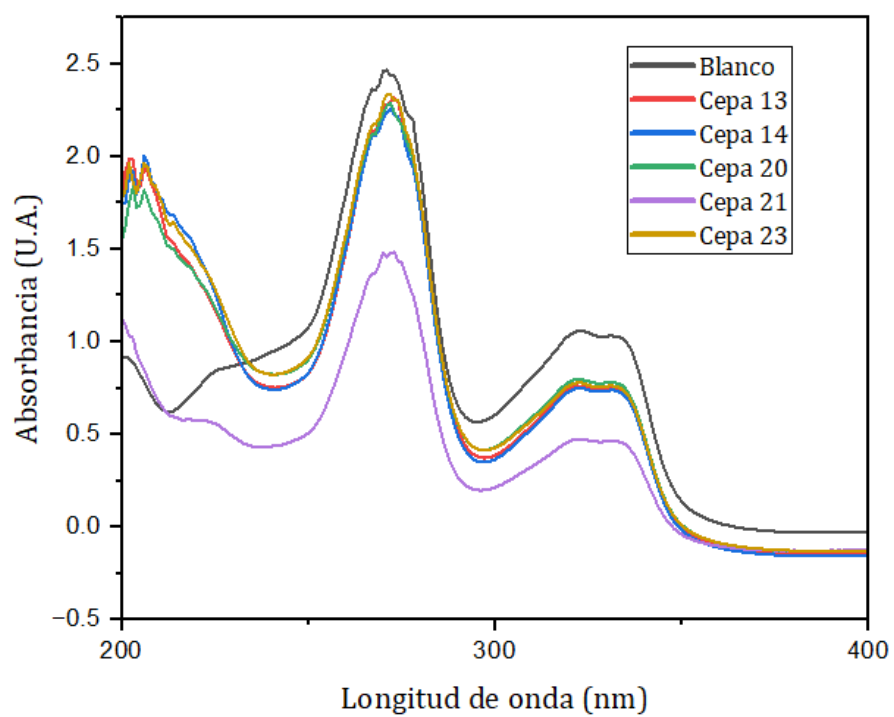


Gráfico 2. Espectro UV-Vis de las 5 cepas con mayor degradación de CIP a 25 ppm en MMM.

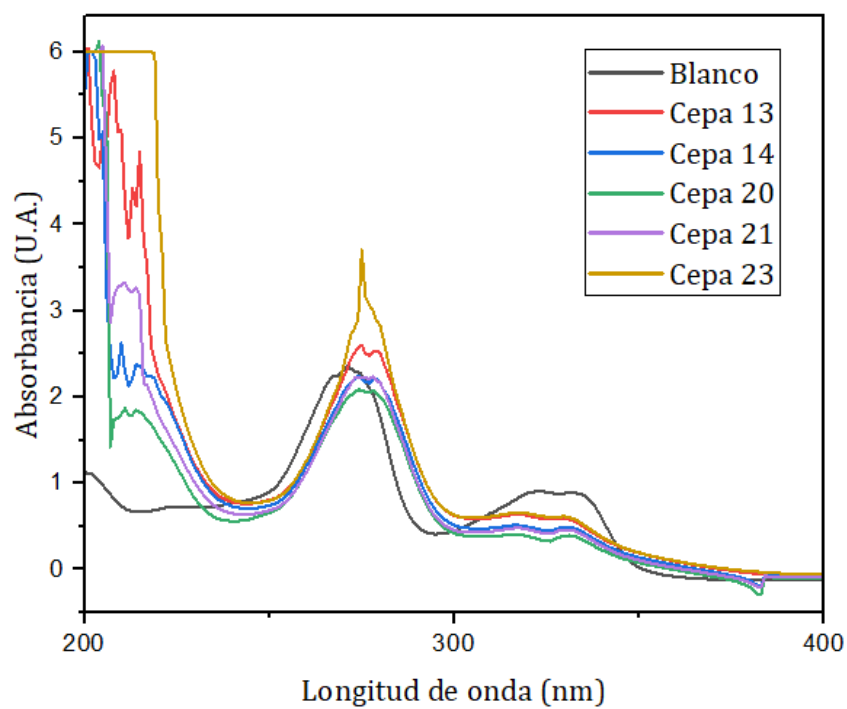


Gráfico 3. Espectro UV-Vis de las 5 cepas con mayor degradación de CIP en MMM + S.

## Formación de consorcios

Los 2 consorcios formados se integraron de la siguiente manera:

| Consortio 1                      | Consortio 2                      |
|----------------------------------|----------------------------------|
| <input type="checkbox"/>         | <input type="checkbox"/>         |
| <input type="checkbox"/> Cepa 13 | <input type="checkbox"/> Cepa 14 |
| <input type="checkbox"/> Cepa 14 | <input type="checkbox"/> Cepa 20 |
| <input type="checkbox"/> Cepa 20 | <input type="checkbox"/> Cepa 21 |
| <input type="checkbox"/> Cepa 21 |                                  |
| <input type="checkbox"/> Cepa 23 |                                  |

## Identificación microbiana

De las 38 cepas iniciales se seleccionaron las 5 que presentaron mayor porcentaje de degradación para CIP, las cuales se les realizaron pruebas bioquímicas por duplicado, los resultados se muestran en la *tabla 7*, además se observó su morfología colonial cuyo recuento se muestra en la *tabla 8*.

*Tabla 7. Resultados e interpretación de pruebas bioquímicas*

| #                                                                                                                                                          | Colonia  | KIA | LIA | H <sub>2</sub> S | Gas glucosa | C | Urea | MR | VP | M | I | O | Identificación                |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------|-----|-----|------------------|-------------|---|------|----|----|---|---|---|-------------------------------|
| 13                                                                                                                                                         | N-C-RT-1 | A/K | R/R | N                | N           | N | P    | P  | N  | P | N | N | <i>Morganella morganii</i>    |
| 14                                                                                                                                                         | K-C-RT-1 | A/K | R/R | P                | N           | P | P    | P  | N  | P | N | P | <i>Proteus vulgaris</i>       |
| 20                                                                                                                                                         | K-L-HT-3 | K/K | R/A | N                | N           | P | N    | P  | N  | P | P | P | <i>Pseudomonas aeruginosa</i> |
| 21                                                                                                                                                         | K-L-RA-1 | A/K | R/A | N                | N           | N | N    | P  | N  | P | N | N | <i>Shigella spp</i>           |
| 23                                                                                                                                                         | K-C-RA-1 | A/K | R/R | N                | P           | N | N    | P  | N  | N | P | P | <i>Shigella sonnei</i>        |
| Nota: KIA (Agar Hierro de Kigler), LIA (Agar Lisina Hierro), C (Citrato), MR (Rojo de Metilo), VP (Voges Proskauer), M (Movilidad), I (Idol), O (Ornitina) |          |     |     |                  |             |   |      |    |    |   |   |   |                               |

*Tabla 8. Morfología colonial*

| #  | Colonia  | Forma    | Elevación | Margen | Color | Apariencia | Densidad | Tamaño (mm) |
|----|----------|----------|-----------|--------|-------|------------|----------|-------------|
| 13 | N-C-RT-1 | Circular | Plana     | Entera | Crema | Suave      | Opaca    | 2           |

|    |          |          |         |          |       |       |             |     |
|----|----------|----------|---------|----------|-------|-------|-------------|-----|
| 14 | K-C-RT-1 | Circular | Convexa | Entera   | Crema | Suave | Opaca       | 2   |
| 20 | K-L-HT-3 | Circular | Convexa | Entera   | Crema | Suave | Trasparente | 1.5 |
| 21 | K-L-RA-1 | Circular | Plana   | Entera   | Crema | Suave | Trasparente | 2   |
| 23 | K-C-RA-1 | Circular | Convexa | Ondulada | Crema | Suave | Opaca       | 2.5 |

## Integración del sistema fotocátalisis-microbiológico y determinación de la cinética de la reacción.

La degradación final de CIP mediante el sistema secuencial fotocátalisis microbiológico se muestra por cada cepa seleccionada y consorcios formados en la *tabla 9*, donde se presenta el porcentaje de degradación con respecto a la última muestra tomada del proceso fotocatalítico y además la degradación completa, es decir, tomando en cuenta la concentración inicial en el proceso fotocatalítico y la última muestra del sistema microbiológico.

Aunque se esperaba una mayor degradación por parte de los consorcios por la sinergia entre especies, en esta investigación se destacaron dos cepas con mayor porcentaje de degradación las cuales son parcialmente identificadas como *Pseudomonas aeruginosa* (cepa 20) y *Shigella spp* (cepa 21) mostrando una degradación parcial de 83.4 y 85% respectivamente y el consorcio 2 que se integra por 3 cepas (*Proteus vulgaris*; *Pseudomonas aeruginosa*; *Shigella spp*) logro una degradación parcial de 80.2%. Y a su vez como se muestra en la *tabla 9* permitieron aumentar el porcentaje de degradación que se tenía previo en el sistema fotocatalítico de 83.59% hasta por encima del 98%.

*Tabla 9 Degradación parcial del sistema microbiológico y degradación total de la integración del proceso fotocatalítico y microbiológico.*

|                     | abs      | [ ]        |            |            |
|---------------------|----------|------------|------------|------------|
| Inicial             | 2.82     | 29.0294995 |            |            |
| Final fotocátalisis | 0.33269  | 2.50149095 | %Parcial   | %Total     |
| 13                  | 0.219395 | 1.29494143 | 48.2332155 | 95.5392223 |
| 14                  | 0.184955 | 0.92816826 | 62.8953978 | 96.8026722 |
| 20                  | 0.13661  | 0.41331203 | 83.4773724 | 98.5762344 |
| 21                  | 0.1329   | 0.37380192 | 85.0568351 | 98.7123377 |
| 23                  | 0.19331  | 1.0171459  | 59.3384137 | 96.4961645 |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |          |            |            |            |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------|------------|------------|------------|
| C1                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 0.149505 | 0.55063898 | 77.9875686 | 98.1031744 |
| C2                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 0.14429  | 0.49510117 | 80.2077568 | 98.2944895 |
| abs= absorbancia (nm), []=concentración (ppm), % =Porcentaje de degradación, 13= <i>Morganella morganii</i> , 14= <i>Proteus vulgaris</i> , 20= <i>Pseudomonas aeruginosa</i> , 21= <i>Shigella spp</i> , 23= <i>Shigella sonnei</i> , C1=Consortio 1 ( <i>Morganella morganii</i> , <i>Proteus vulgaris</i> , <i>Pseudomonas aeruginosa</i> , <i>Shigella spp</i> , <i>Shigella sonnei</i> ), C2= Consortio 2 ( <i>Proteus vulgaris</i> , <i>Pseudomonas aeruginosa</i> , <i>Shigella spp</i> ). |          |            |            |            |

En el *grafico 4* se presentan los espectros de absorbancia de la degradación completa desde la disolución del CIP con el fotocatalizador  $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ , final del tratamiento fotocatalítico y final del tratamiento microbiológico de los residuos de la fotocatálisis con la cepa 20, el cual fue el ensayo que obtuvo mayor degradación en comparación con las demás cepas.

La bacteria que logro la mayor degradación corresponde al género de pseudomonas, las cuales han sido ampliamente estudiadas por su flexibilidad metabólica, adaptabilidad en diversos entornos y su eficacia en la degradación de diversos contaminantes, como metales pesados, hidrocarburos, pesticidas y demás contaminantes emergentes como los antibióticos, esto sucede por su capacidad de usar a los contaminantes como fuente de carbono y energía, además la producción de biosurfactantes permite aumentar la biodisponibilidad de ciertos contaminantes (Wang et al., 2025). Entre este género la especie *Pseudomona aeruginosa* identificada en la presente investigación, ha sido estudiado por Li et al. (2021) donde mencionan que esta especie tiene la capacidad de formar una especie de compuesto agregado que consiste en óxidos de manganeso (Mn), y que al poner en contacto con CIP se determinó que el agregado formado tiene la capacidad de degradar completamente el CIP en concentraciones de 1, 5 y 10 ppm.

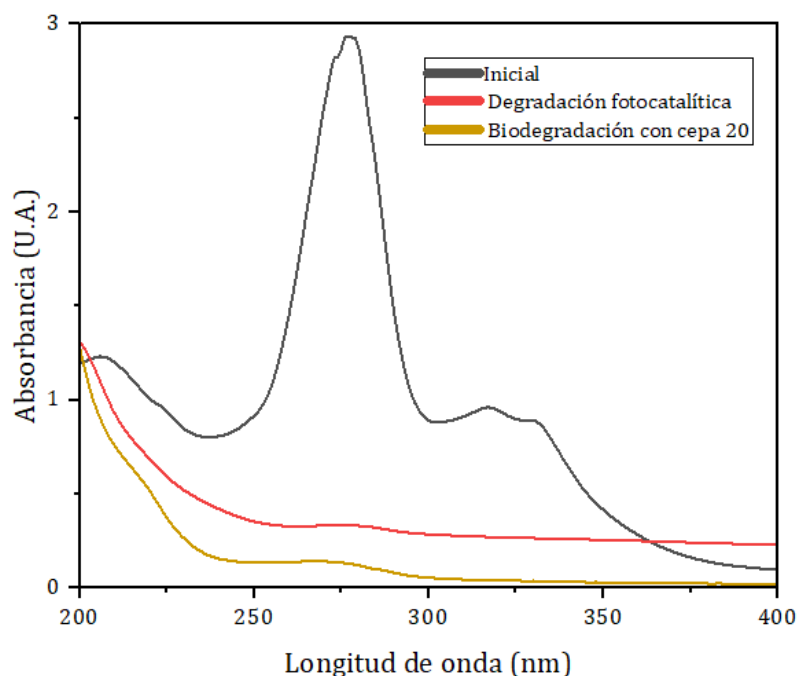


Gráfico 4. Degradación de CIP por el sistema fotocátalisis-microbiológico.

En la *tabla 10* se muestran los coeficientes de correlación con respecto a la cinética de reacción de orden 0, donde se considera la concentración en función del tiempo, orden 1; se considera el logaritmo natural de la concentración con respecto al tiempo y orden 2 que se toma la concentración inversa en función del tiempo. Con los coeficientes es posible determinar el orden de la reacción, se determina con el número mayor o más cercano a 1, en la *tabla 10* se muestra que todos los tratamientos presentan una cinética de primer orden, es decir, que la velocidad de reacción es proporcional a la concentración del reactivo, entonces, a medida que disminuye la concentración de CIP, la velocidad de su degradación también disminuye.

La cinética de primer orden es común en la degradación de contaminantes emergentes como los antibióticos principalmente por reacciones químicas y biológicas como la fotocátalisis y por procesos biológicos (Chen et al., 2021).

*Tabla 10. Coeficientes de correlación de la degradación por cada cepa y consorcios formados (elaboración propia).*

| COLONIA | ORDEN  |        |        |
|---------|--------|--------|--------|
|         | 0      | 1      | 2      |
| 13      | 0.9966 | 0.997  | 0.6759 |
| 14      | 0.8502 | 0.8825 | 0.83   |
| 20      | 0.8872 | 0.8574 | 0.7654 |
| 21      | 0.9334 | 0.955  | 0.8186 |
| 23      | 0.753  | 0.798  | 0.796  |
| C1      | 0.9493 | 0.9681 | 0.9364 |
| C2      | 0.8913 | 0.9635 | 0.7126 |

## Prueba de toxicidad

Después de las 120 horas de exposición de las semillas al agua tratada fue posible determinar el índice de germinación (IG) con respecto al crecimiento radicular y el número de semillas germinadas en cada caso, los resultados se muestran en la *tabla* 9. La determinación de este índice funciona para indicar si el sustrato favorece o inhibe el crecimiento radicular. En la *tabla* 9 se subraya como la cepa 20, el consorcio 1 y 2 con el índice de germinación más alto en comparación con los demás ensayos que se encuentran por debajo de un índice de 50.

*Tabla 11 Parámetros evaluados en la germinación de Medicago Sativa ante su exposición con los residuos de agua tratada de CJP con un sistema fotocatalítico -microbiológico.*

|                                    | Cepa | # | L     | GRS (%) | CRR (%) | IG       |
|------------------------------------|------|---|-------|---------|---------|----------|
| Control                            |      | 5 | 4.34  |         |         |          |
| Sin tratamiento                    |      | 1 | 1.7   | 20      | 39.535  | 7.906977 |
| TiO <sub>2</sub> /SiO <sub>2</sub> | 13   | 4 | 2.425 | 80      | 56.40   | 45.12    |
|                                    | 14   | 2 | 2.6   | 40      | 60.47   | 24.19    |
|                                    | 20   | 4 | 2.9   | 80      | 66.86   | 53.95    |
|                                    | 21   | 4 | 2.4   | 80      | 55.81   | 44.65    |
|                                    | 23   | 4 | 2.75  | 80      | 63.953  | 51.16279 |
|                                    | C1   | 5 | 2.2   | 100     | 51.16   | 51.16    |
|                                    | C2   | 4 | 2.8   | 80      | 67.44   | 53.49    |

#; número de semillas germinadas, L; longitud promedio de radícula, 13= *Morganella morganii*, 14= *Proteus vulgaris*, 20= *Pseudomonas aeruginosa*, 21= *Shigella spp*, 23= *Shigella sonnei*, C1=Consortorio 1 (*Morganella morganii*, *Proteus vulgaris*, *Pseudomonas*

*aeruginosa, Shigella spp, Shigella sonnei*), C2= Consorcio 2 (*Proteus vulgaris, Pseudomonas aeruginosa, Shigella spp*)

De acuerdo con Buendía et al., (2017) los valores del IG menores al 50 % indican alta fitotoxicidad, valores de 50 a 80 % sugieren fitotoxicidad moderada, y valores superiores a 80 y menores a 100 % indican que no existe fitotoxicidad y si se excede el 100 %, se considera fitonutrimiento o fitoestimulante, con lo anterior es posible establecer que las alícuotas tratadas con cepas 13, 14 y 21 que se muestran por debajo de un IG 50 indican alta fitotoxicidad, es decir, el agua tratada tienen efectos directos en la germinación y desarrollo radicular. Por su parte las alícuotas tratadas con los consorcios microbianos y las cepas 20 y 23 muestran un IG mayor a 50 pero menor a 80, lo que indica una fitotoxicidad moderada, en la cual se tienen efectos en el crecimiento de las retículas, pero no tanto sobre la germinación.

En cuanto a los valores obtenidos de la exposición de las semillas con CIP sin tratamiento, se muestran valores bajos en GRS, esto se debe a que el CIP tiene efectos significativos sobre la germinación de semillas de alfalfa y a su vez afecta el crecimiento de la retícula. Por lo que al comparar con los valores de las alícuotas tratadas, es posible notar que la toxicidad sobre la germinación de las semillas bajo considerablemente, alcanzando el tratamiento del consorcio 2 un GRS de 100%, es decir, todas las semillas germinaron. En un estudio realizado por Vilca et al. (2021) identificaron que al contener CIP en agua de riego para alfalfa producía efectos tóxicos, principalmente en la formación de nódulos en la retícula y el crecimiento de esta, la cual se detectó que es inversamente proporcional a la concentración de CIP, de tal modo que con la presente investigación es posible confirmar esta proporcionalidad, pues la cepa que logro disminuir más la concentración de CIP alcanzo un mayor crecimiento reticular y por lo tanto un IG superior en comparación con los demás tratamientos.

## CONCLUSIONES

El dióxido de titanio ( $\text{TiO}_2$ ) dopado en dióxido de silicio ( $\text{SiO}_2$ ) como catalizador tiene la capacidad de degradar el CIP mediante fotocátalisis heterogénea, esto durante una exposición a luz solar de 8 horas. Al usar radiación solar en el proceso fotocatalítico reduce los costos del tratamiento, además es una fuente de energía limpia e inagotable, sin embargo, las condiciones climáticas y la intensidad solar son factores incontrolables que pueden prolongar el tiempo de degradación por fotocátalisis heterogénea.

Las especies bacterianas *Morganella morganii*, *Proteus vulgaris*, *Pseudomonas aeruginosa*, *Shigella spp*, *Shigella sonnei*, presentan la capacidad de biodegradar CIP a una concentración de 25 ppm.

Las pruebas de fitotoxicidad indicaron alta toxicidad en el agua sin tratamiento, así mismo las alícuotas tratadas con *Morganella morganii*, *Proteus vulgaris*, *Shigella sonnei*, no disminuyeron considerablemente la toxicidad debido a la poca germinación de las semillas de medicago sativa (alfalfa), lo cual puede deberse a la producción de subproductos tóxicos que afectan el proceso de germinación y por lo tanto no es recomendable reintroducirla en el ambiente.

Aunque el análisis de degradación del acoplamiento de los sistemas fotocátalisis-microbiológico sea posible por espectrofotometría UV-Vis, es importante detectar los subproductos generados mediante técnicas analíticas más sensibles, como cromatografía líquida de alta resolución (HPLC) que permite conocer con mayor precisión la concentración final del contaminante y de sus productos de degradación.

De acuerdo con los resultados obtenidos del acoplamiento del sistema fotocatalítico-microbiológico en la degradación de CIP de hasta 98.7% usando  $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$  como fotocatalizador y la cepa *Pseudomona aeruginosa* como agente biológico, permite abrir el panorama de la degradación de contaminantes emergentes en especial los antibióticos, ya que la fotocátalisis reduce notablemente la concentración de CIP hasta 83.5%, dando paso a la actividad microbiológica que al tener moléculas más sencillas las bacterias mineralizan

con mayor facilidad, obteniendo un porcentaje de degradación final mayor en comparación con los resultados individuales.

Al usar agentes biológicos en la biorremediación y radiación solar en el sistema fotocatalítico, se reducen los costos en comparación con tratamientos convencionales, por lo que el acoplamiento del sistema es una opción para abordar el problema del aumento de contaminantes emergentes en el ambiente.

## Anexo 1. Preparación de MMM

Tabla 12. Reactivos y proporciones para la preparación de medio mínimo mineral (MMM) en 1000 mL.

| Reactivo                      | Formula                                   | mg/L  |
|-------------------------------|-------------------------------------------|-------|
| Fosfato monobásico de potasio | $\text{KH}_2\text{PO}_4$                  | 0.4   |
| Fosfato dibásico de potasio   | $\text{K}_2\text{HPO}_4$                  | 2     |
| Sulfato de magnesio           | $\text{MgSO}_4$                           | 0.2   |
| Molibdato de sodio            | $\text{Na}_2\text{MoO}_4$                 | 0.001 |
| Sulfato de hierro             | $\text{FeSO}_4$                           | 0.005 |
| Cloruro de calcio             | $\text{CaCl}_2$                           | 0.1   |
| Ácido bórico                  | $\text{H}_3\text{BO}_3$                   | 0.002 |
| Sulfato de zinc               | $\text{ZnSO}_4$                           | 0.005 |
| Sulfato de manganeso          | $\text{MnSO}_4$                           | 0.003 |
| Sulfato cobaltoso             | $\text{CoSO}_4$                           | 0.001 |
| Sulfato de níquel             | $\text{NiSO}_4$                           | 0.001 |
| *Sacarosa*                    | $\text{C}_{12}\text{H}_{22}\text{O}_{11}$ | 3     |

## Anexo 2. Preparación de caldo Luria Bertani (LB)

Tabla 13. Reactivos y proporciones para la preparación de caldo LB en 1000 mL.

| Reactivo             | g/L |
|----------------------|-----|
| Peptona de caseína   | 10  |
| Extracto de levadura | 5   |
| Cloruro de sodio     | 10  |

## Anexo 3. Curvas de calibración

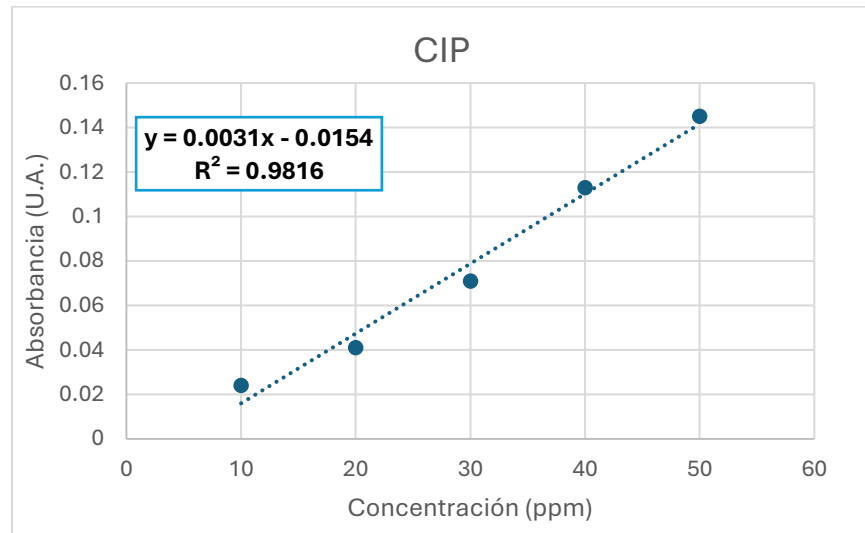


Gráfico 5. Curva de calibración para CIP en medio acuoso de 10 a 50 ppm (elaboración propia).

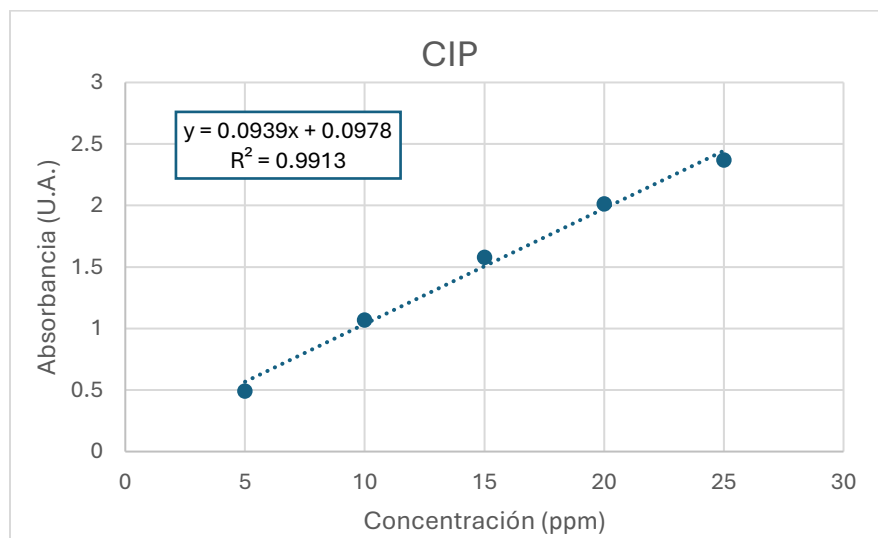


Gráfico 6. Curva de calibración para CIP en medio acuoso obtenida en esta investigación (elaboración propia).

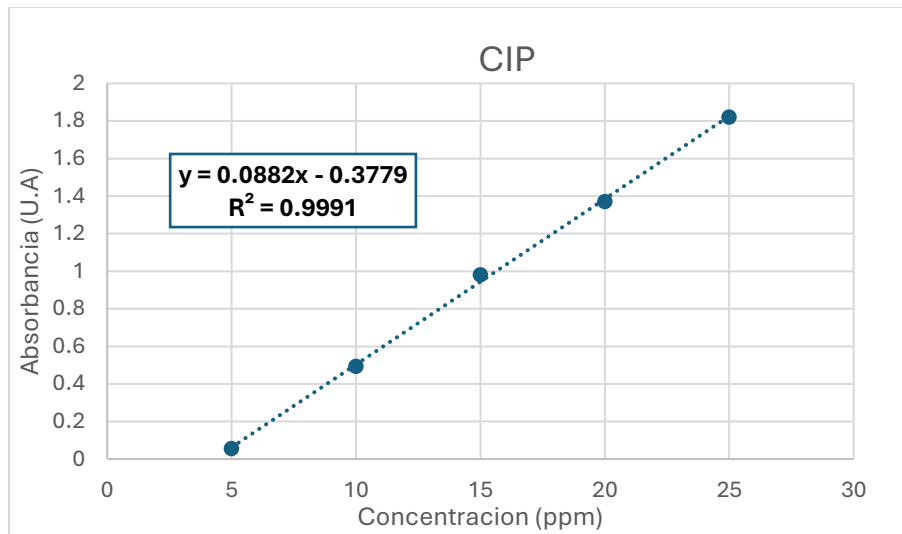


Gráfico 7. Curva de calibración para CIP en MMM obtenida en esta investigación (elaboración propia).

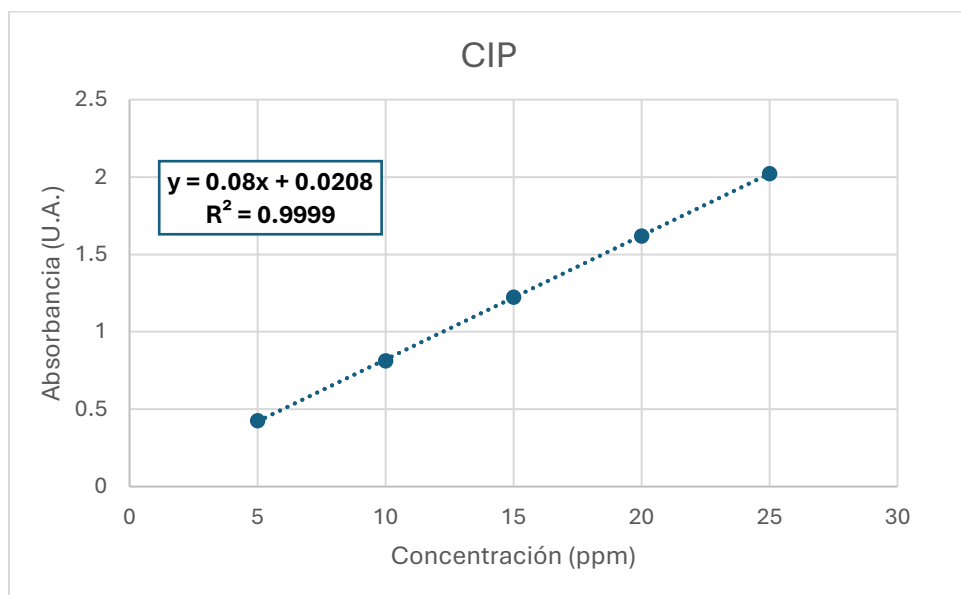


Gráfico 8. Curva de calibración para CIP en MMM adicionado con sacarosa obtenida en esta investigación (elaboración propia).

## BIBLIOGRAFÍA

- United Nations. (2023). *Agua | Naciones Unidas*. Recuperado de <https://www.un.org/es/global-issues/water>
- Reinoso, J., Serrano, D., & Orellana, C. (2017). In *Revista De La Facultad De Ciencias Médicas*. [http://dspace.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/30096/1/07%20Contaminantes%20Emergentes%2055-59%20\(1\).pdf](http://dspace.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/30096/1/07%20Contaminantes%20Emergentes%2055-59%20(1).pdf)
- Martínez A., Soto J., & Lahora, A. (2020). Antibióticos como contaminantes emergentes. Riesgo ecotoxicológico y control en aguas residuales y depuradas: (“Antibióticos como contaminantes emergentes. Riesgo ecotoxicológico y ...”) *Ecosistemas*, 29(3), 2070. <https://doi.org/10.7818/ECOS.2070>
- Yang Y., Sik Y., Kim K-H., Kwon E., Tsang Y., Occurrences and removal of pharmaceuticals and personal care products (PPCPs) in drinking water and water/sewage treatment plants: A review, *Science of The Total Environment*, Volumes 596–597, 2017, Pages 303-320, ISSN 0048-9697, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.04.102>.
- Objetivos de Desarrollo Sostenible*. (2015). UNDP. <https://www.undp.org/es/sustainable-development-goals/agua-limpia-saneamiento>
- Garzón, J. M., Rodríguez, J. P., & Hernández, C. (2017). Aporte de la biorremediación para solucionar problemas de contaminación. *Universidad Y Salud*, 19(2), 309. <https://doi.org/10.22267/rus.171902.93>
- Bolong N., Ismail A.F., Salim M.R., Matsuura T., A review of the effects of emerging contaminants in wastewater and options for their removal, *Desalination*, Volume 239, Issues 1–3, 2009, Pages 229-246, ISSN 0011-9164, <https://doi.org/10.1016/j.desal.2008.03.020>.
- Garcés L. M., Mejía E. A., & Santamaría J. J, La fotocatalisis como alternativa para el tratamiento de aguas residuales, *Revista Lasallista de Investigación*, vol. 1, núm. 1, junio, 2004, pp. 83-92 Corporación Universitaria Lasallista, Antioquia, Colombia
- Li X., Shen X., Jiang W., Xi Y., Li S., Comprehensive review of emerging contaminants: Detection technologies, environmental impact, and management strategies, *Ecotoxicology and Environmental Safety*, Volume 278, 2024, 116420, ISSN 0147-6513, <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2024.116420>.
- Torres, A., Hazel Alejandro Rodríguez, & Ayala, M. (2023). Contaminantes emergentes en México. *Deleted Journal*, 26. <https://doi.org/10.22201/fesz.23958723e.2023.590>
- Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA). (2018). El desafío de los contaminantes emergentes. Gob.mx. <https://www.gob.mx/imta/articulos/el-desafio-de-los-contaminantes-emergentes>
- Ortega Romero, M., & Soriano, A. (2000). Efectos adversos de las fluoroquinolonas. *Medicina Integral*, 36(10), 396–399. <https://www.elsevier.es/es-revista-medicina-integral-63-articulo-efectosadversos-las-fluoroquinolonas-10022184>

- Werth, B. J. (2022, May 5). Fluoroquinolonas. Manual MSD Versión Para Profesionales; Manuales MSD. <https://www.msdmanuals.com/es/professional/enfermedades-infecciosas/bacterias-y-f%C3%A1rmacos-antibacterianos/fluoroquinolonas>
- MedlinePlus medicinas. (2021). Medlineplus.gov. [https://medlineplus.gov/spanish/druginfo/meds/a688016-es.html#:~:text=La%20ciprofloxacina%20se%20usa%20para,diarrea%20intensa\)%3B%20e%20infecciones](https://medlineplus.gov/spanish/druginfo/meds/a688016-es.html#:~:text=La%20ciprofloxacina%20se%20usa%20para,diarrea%20intensa)%3B%20e%20infecciones)
- Ripoll, A. G. (2008). Aumento de biodegradabilidad y eliminación de plaguicidas en ..., Valencia: Universidad Politécnica de Valencia. [https://www.academia.edu/88886954/Aumento\\_de\\_biodegradabilidad\\_y\\_eliminaci%C3%B3n\\_de\\_plaguicidas\\_en\\_efluentes\\_acuosos\\_mediante\\_m%C3%A9todos\\_de\\_oxidaci%C3%B3n\\_avanzada\\_fotocat%C3%A1lisis\\_solar\\_](https://www.academia.edu/88886954/Aumento_de_biodegradabilidad_y_eliminaci%C3%B3n_de_plaguicidas_en_efluentes_acuosos_mediante_m%C3%A9todos_de_oxidaci%C3%B3n_avanzada_fotocat%C3%A1lisis_solar_).
- World Bank (2023). Agua panorama general. Recuperado de <https://www.bancomundial.org/es/topic/water/overview>
- Veolia Water Technologies. (2023). *Aguas residuales: cómo se reutilizan y cuál es su importancia*, <https://golatam.veoliawatertechnologies.com/es/blog/aguas-residuales-como-se-reutilizan-y-cual-es-su-importancia>.
- SEMARNAT (2014). *Informe del Medio Ambiente*. Semarnat.gob.mx. <https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe15/tema/cap6.html>
- Becerril J., E., (2009). Contaminantes emergentes en el agua. *Unam.mx*. <https://ru.tic.unam.mx/handle/123456789/1529>
- SEMARNAT (2024). El desafío de los contaminantes emergentes. Gob.mx. <https://www.gob.mx/imta/articulos/el-desafio-de-los-contaminantes-emergentes>
- Zhang Y., Zhang X., Wang S., (2023) Recent advances in the removal of emerging contaminants from water by novel molecularly imprinted materials in advanced oxidation processes—A review, *Science of The Total Environment*, Volume 883, 163702, ISSN 0048-9697, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.163702>.
- Papich M., G., (2016), Ciprofloxacin Hydrochloride, Editor(s): Mark G. Papich, Saunders Handbook of Veterinary Drugs (Fourth Edition), W.B. Saunders, Pages 159-161, ISBN 9780323244855, <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-24485-5.00160-1>.
- Sethuraman J., Dogra K., Kumar R., Raval N., Leifels M., Mukherjee S., Trivedi M., Shirish M., Zang J., Barceló D., Mählknecht J., Kumar M., (2024) Tricks and tracks of prevalence, occurrences, treatment technologies, and challenges of mixtures of emerging contaminants in the environment: With special emphasis on microplastic, *Journal of Contaminant Hydrology*, Volume 265, 104389, ISSN 0169-7722, <https://doi.org/10.1016/j.jconhyd.2024.104389>.
- Selim M., Tounsi A., Gomaa H., Hu N., Shenashen M., (2024) Addressing emerging contaminants in wastewater: Insights from adsorption isotherms and adsorbents: A comprehensive review, *Alexandria Engineering Journal*, Volume 100, 2024, Pages 61-71, ISSN 1110-0168, <https://doi.org/10.1016/j.aej.2024.05.022>.

- Preethi, Prakash S., Kumar G., Yogalakshmi K. N, Gunasekaran M, Banu R., (2024) Recent progress in mineralization of emerging contaminants by advanced oxidation process: A review, *Environmental Pollution*, Volume 341, 122842, ISSN 0269-7491, <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.122842>.
- Ding X., Yu Q., Ren H., Geng J., (2024) Degradation of conjugated estrogen in visible light-driven intimately coupled photocatalysis and biodegradation system, *Bioresource Technology*, Volume 406, 2024, 131045, ISSN 0960-8524, <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2024.131045>.
- Wu Y., Gao P., Li Y., Yang Z., Wan K., Zhang X., (2024) Degradation of SF<sub>6</sub> by dielectric barrier discharge cooperating with TiO<sub>2</sub> photocatalysis: Insights into the reaction mechanism, *Applied Surface Science*, Volume 660, 159957, ISSN 0169-4332, <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2024.159957>.
- Mendoza, O. G., Ceballos, L., Pérez, A., Castellanos, F. y Rincón, A. Y., (2020). Silicio- (SiO<sub>2</sub>). *En: Atlas Geoquímico de Colombia, versión 2020, Bogotá: Servicio Geológico Colombiano*.
- Geoquímica Y | PDF | Andes | Geoquímica - Scribd*, <https://www.scribd.com/document/593125089/geoquimica-Y>.
- Cruz-Guzmán Alcalá, M. (2007). La contaminación de suelos y aguas: su prevención con nuevas sustancias naturales. España: Universidad de Sevilla. (95-96)
- Castillo Rogel, Rosita T., More Calero, Francis J., Cornejo La Torre, Melitza, Fernández Ponce, Jaime N., & Mialhe Matonnier, Eric L. (2020). Aislamiento de bacterias con potencial biorremediador y análisis de comunidades bacterianas de zona impactada por 9 derrame de petróleo en Condorcanqui - Amazonas - Perú. *Revista de Investigaciones Altoandinas*, 22(3), 215-225. <https://dx.doi.org/10.18271/ria.2020.656>
- Agencia Española de Medicamentos y Productos Sanitarios (AEMPS). (2020) <http://www.aemps.gob.es>
- Hassani, A., Khataee, A., & Karaca, S. (2015). Photocatalytic degradation of ciprofloxacin by synthesized TiO<sub>2</sub> nanoparticles on montmorillonite: Effect of operation parameters and artificial neural network modeling. *Journal of Molecular Catalysis A: Chemical*, 409, 149–161.
- González, N., Martins, P. M., Tavares, C. J., & Senentxu Lanceros-Méndez. (2024). Quercetin-mediated green synthesis of Au/TiO<sub>2</sub> nanocomposites for the photocatalytic degradation of antibiotic ciprofloxacin. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2024.09.003>
- Pan, L., Li, J., Li, C., Tang, X., Yu, G., & Wang, Y. (2017). Study of ciprofloxacin biodegradation by a *Thermus* sp. isolated from pharmaceutical sludge. *Journal of Hazardous Materials*, 343, 59–67. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2017.09.009>

- National Geographic. (2010). *El calentamiento de los océanos ha disparado el blanqueo de los corales*. National Geographic. <https://www.nationalgeographic.es/medio-ambiente/contaminacion-del-agua>
- Segura L. & López J. (2003) Principios básicos de Contaminación Ambiental México UAEM. ("Universidad Autónoma del Estado de México Licenciatura en Ciencias ...") <https://books.google.com.mx/books?id=pKP2BHi8FVsC>
- National Library of Medicine (2021) *Antibióticos*. Medlineplus.gov. <https://medlineplus.gov/spanish/antibiotics.html#:~:text=Los%20antibi%C3%B3ticos%20son%20medicamentos%20que,ser%20pastillas%2C%20c%C3%A1psulas%20o%20l%C3%ADquidos>
- Esparza M. J. Descripción de los principales grupos de fármacos antimicrobianos. Antibióticos. (v.2/2008). Guía\_ABE. Infecciones en Pediatría. Guía rápida para la selección del tratamiento antimicrobiano empírico actualizado el 22/11/2008; Disponible en <http://www.guia-abe.es>
- Alós J.-I. (2009). Quinolonas. *Enfermedades Infecciosas Y Microbiología Clínica*, 27(5), 290–297. <https://doi.org/10.1016/j.eimc.2009.03.001>
- Meléndez-Marmolejo J, García-Saavedra Y, Galván-Romero V, Díaz de León-Martínez L, Vargas-Berrones K, Mejía-Saavedra J, Flores Ramírez R. Contaminantes emergentes. Problemática ambiental asociada al uso de antibióticos. Nuevas técnicas de detección, remediación y perspectivas de legislación en América Latina. *Rev. salud ambiente*. 2020; 20(1):53-61.
- Kuppan, N., Padman, M., Mahadeva, M., Srinivasan, S., & Devarajan, R. (2024). A comprehensive review of sustainable bioremediation techniques: Eco friendly solutions for waste and pollution management. *Waste Management Bulletin*, 2(3), 154–171. <https://doi.org/10.1016/j.wmb.2024.07.005>
- Hussain, A., Rehman, F., Hamza Rafeeq, Muhammad Waqas, Asghar, A., Afsheen, N., Abbas Rahdar, Bilal, M., & Iqbal, H. M. N. (2021). In-situ, Ex-situ, and nano-remediation strategies to treat polluted soil, water, and air – A review. *Chemosphere*, 289, 133252–133252. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.133252>
- Rodríguez Romero AJ, Robles Salazar CA, Ruíz Picos RA, López López E, Sedeño Díaz JE y Rodríguez Dorantes A. Índices de germinación y elongación radical de *Lactuca sativa* en el biomonitorio de la calidad del agua del río Chalma. *Rev. Int. Contam. Ambie.* 2014; 30 (3): 307-316
- Feng, N.-X., Yu, J., Xiang, L., Yu, L.-Y., Zhao, H.-M., Mo, C.-H., Li, Y.-W., Cai, Q.-Y., Wong, M.-H., & Li, Q. X. (2019). Co-metabolic degradation of the antibiotic ciprofloxacin by the enriched bacterial consortium XG and its bacterial community composition. *The Science of the Total Environment*, 665, 41–51. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.01.322>
- Oyegbeda, Akpotu, S. O., & Moodley, B. (2024). Dual functional covalent triazine framework-TiO<sub>2</sub> S-scheme heterojunction for efficient sequestration of ciprofloxacin: Mechanism and degradation products. *Environmental Research*, 120501–120501. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.120501>

- GOB (2024). Certificación de alimentos. Gob.mx. <https://www.gob.mx/cofepris/acciones-y-programas/certificacion-de-alimentos-76095>
- GOB (2025). Estrategia Nacional contra la Resistencia a los Antimicrobianos (RAM). Gob.mx. <https://www.gob.mx/senasica/acciones-y-programas/resistencia-a-los-antimicrobianos-ram>
- FAO (2021) *Resistencia a los antimicrobianos | Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura*. Fao.org. <https://www.fao.org/antimicrobial-resistance/es/>
- OMS (2016). *Industrial Applications of Nanoparticles*. CRC Press. <https://www.who.int/es/publications/i/item/9789241509763>
- Sánchez-Huesca R, Lerma A, Guzmán-Saldaña RME, Lerma C. Prevalence of Antibiotics Prescription and Assessment of Prescribed Daily Dose in Outpatients from Mexico City. *Antibiotics* (Basel). 2020 Jan 20;9(1):38. doi: 10.3390/antibiotics9010038. PMID: 31968527; PMCID: PMC7168224.
- Dreser, Anahí, Wirtz, Veronika J, Corbett, Kitty K, & Echániz, Gabriela. (2008). Uso de antibióticos en México: revisión de problemas y políticas. *Salud Pública de México*, 50(Supl. 4), S480-S487. Recuperado de [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0036-36342008001000009&lng=es&tlng=es](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0036-36342008001000009&lng=es&tlng=es).
- Gonzalez Gonzalez, E. D., Gómez Olivan, L. M., Galar Martínez, M., Islas Flores, H., & Hernández Navarro, M. D. (2021). Ocurrencia, destino, detección y efectos de antibióticos en ambientes acuáticos. *AMEQA*. <http://hdl.handle.net/20.500.11799/111366>
- Buendía-Valverde, María de la Luz; Trejo-Téllez, Libia Iris; Corona-Torres, Tarsicio; Aguilar-Rincón, Víctor Heber (2017.) CADMIO, TALIO Y VANADIO AFECTAN DIFERENCIALMENTE LA GERMINACIÓN Y CRECIMIENTO INICIAL DE TRES VARIEDADES DE CHILE *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, vol. 34, núm. 4, 2018, noviembre-diciembre, pp. 737-749 Universidad Nacional Autónoma de México México DOI: <https://doi.org/10.20937/RICA.2018.34.04.14>
- Hussein RR, Rabie ASI, Bin Shaman M, Shaaban AH, Fahmy AM, Sofy MR, Lattyak EA, Abuelhana A, Naguib IA, Ashour AM, Aldeyab MA (2022) Consumo de antibióticos en hospitales durante la pandemia de COVID-19: un estudio comparativo. *J Infect Dev Ctries* 16:1679–1686. doi: 10.3855/jidc.17148
- Chen, Y., Li, Y., Luo, N., Shang, W., Shi, S., Li, H., Liang, Y., & Zhou, A. (2021). Kinetic comparison of photocatalysis with H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>-free photo-Fenton process on BiVO<sub>4</sub> and the effective antibiotic degradation. *Chemical Engineering Journal*, 429, 132577–132577. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.132577>
- Mahanta, U., Khandelwal, M., & Deshpande, A. S. (2022). TiO<sub>2</sub>@SiO<sub>2</sub> nanoparticles for methylene blue removal and photocatalytic degradation under natural sunlight and low-power UV light. *Applied Surface Science*, 576(151745), 151745. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2021.151745>

- Li, L., Liu, J., Zeng, J., Li, J., Liu, Y., Sun, X., Xu, L., & Li, L. (2021). Complete Degradation and Detoxification of Ciprofloxacin by a Micro-/Nanostructured Biogenic Mn Oxide Composite from a Highly Active Mn<sup>2+</sup>-Oxidizing *Pseudomonas* Strain. *Nanomaterials*, *11*(7), 1660. <https://doi.org/10.3390/nano11071660>
- Wang, L., Zhang, X., Lu, J., & Huang, L. (2025). Microbial diversity and interactions: Synergistic effects and potential applications of *Pseudomonas* and *Bacillus* consortia. *Microbiological Research*, *293*, 128054–128054. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2025.128054>
- Vilca, F., Ponce, T. E., Loayza, O. D., Junqueira, L., Galarza, N., Leon, R., Maldonado, I., s Quiróz, C. N., & Tornisielo, V. (2021). Antibiotic Ciprofloxacin in Irrigation Water: Its Effect on *Medicago sativa* (Alfalfa), Including Carbon Fixation and Root Growth. *Environmental Engineering Science*, *41*(7), 271–277. <https://doi.org/10.1089/ees.2023.0329>