

TECNOLÓGICO DE ESTUDIOS SUPERIORES DE TIANGUISTENCO

DIVISIÓN DE INGENIERÍA AMBIENTAL

OPCIÓN IX
TESIS

ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LA APLICACIÓN DE AGUA QUÍMICAMENTE ACTIVADA
PARA LA DESACTIVACIÓN BACTERIANA Y DEGRADACIÓN DEL NARANJA (II)
UTILIZANDO AGENTES AVANZADOS DE OXIDACIÓN.

Que para obtener el Título de
INGENIERO AMBIENTAL

PRESENTA

PAOLA BRIGITTE GONZÁLEZ ROMERO

DIRECTORA:
BETHSABET JARAMILLO SIERRA

ASESOR:
BENJAMÍN GONZALO RODRÍGUEZ MÉNDEZ

NOVIEMBRE 2024

El presente trabajo se realizó en las instalaciones del Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares (ININ), en el laboratorio de Física de Plasmas (Desarrollo experimental de la desactivación bacteriana) bajo la dirección del Dr. Benjamín Gonzalo Rodríguez Méndez y en las instalaciones del Tecnológico de Estudios Superiores de Tianguistenco, en el laboratorio de Instrumental de la División de Ingeniería Ambiental (Desarrollo experimental de la degradación del colorante Naranja (II)) bajo la dirección de la Dra. Bethsabet Jaramillo Sierra, este último con soporte económico brindado por el Tecnológico Nacional de México como parte del proyecto 20409.24-PD.

Este trabajo de investigación fue registrado con el título: “*Estudio experimental de la aplicación de agua químicamente activada para la desactivación bacteriana y degradación del naranja (II) utilizando agentes avanzados de oxidación.*”, con el número ACA-IA/PI-031 ante la Academia de Ingeniería Ambiental.

El trabajo se inscribe en la línea de investigación: Desarrollo de Materiales, Procesos Fisicoquímicos y de Oxidación, Novedosos para Aplicación Ambiental del Programa de Ingeniería Ambiental del Tecnológico de Estudios Superiores de Tianguistenco

DEDICATORIA

A mis padres, por la importancia de existir, vivir, soñar y ser lo que soy, por su sacrificio y ejemplo de superación y confianza, por su amor y amistad incondicional, porque sin su apoyo no hubiera sido posible estar hoy aquí, por lo que ha sido y será.

Gracias, los amo.

AGRADECIMIENTOS

Gracias infinitas a mis padres, hermanas y familia por ser el pilar de la persona en la que me estoy convirtiendo, su amor y apoyo incondicional.

Agradecimiento especial a la Dra. Bethsabet Jaramillo Sierra por su apoyo incondicional, su dosis de motivación continua y despertar mi interés por la ciencia e investigación.

Gracias a todos los profesores, doctores, licenciados e ingenieros que me aportaron, formaron y forjaron.

Gracias a todas las personas que me brindaron su amistad durante esta etapa de mi vida, por compartir sus alegrías y tristezas, y motivación mutua para lograr llegar a la recta final de esta carrera.

Gracias al Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares por brindarme un espacio en sus instalaciones para llevar a cabo la parte experimental de este proyecto y permitirme conocer a personas llenas de amor por la ciencia y deseo de compartir su conocimiento.

Gracias a mi casa de estudios Tecnológico de estudios superiores de Tianguistenco por regalarme 4 años de aprendizaje continuo y brindarme sus áreas para el desarrollo experimental de este trabajo.

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	x
ABSTRACT	xii
INTRODUCCIÓN	xiii
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	ix
JUSTIFICACIÓN	xi
OBJETIVOS	xii
OBJETIVO GENERAL	xii
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	xii
HIPÓTESIS	xii
Capítulo 1.....	1
Generalidades.....	1
1.1. Agua	2
1.1.1. Tipos de agua	2
1.1.2. Propiedades fisicoquímicas del agua.....	2
1.1.3. Aplicaciones del agua	3
1.2. Contaminación del agua	3
1.3. Tipos de contaminantes del agua.....	4
1.3.1. Biológicos	4
1.3.1.1. Virus	5
1.3.1.2. Hongos	5
1.3.1.3. Bacterias.....	6
1.3.1.3.1. <i>Staphylococcus aureus</i>	8
1.3.1.3.2. <i>Salmonella typhimurium</i>	8
1.3.1.3.3. <i>Escherichia coli</i>	9
1.3.2. Emergentes	9
1.3.3. Orgánicos e inorgánicos.....	9
1.3.3.1. Fenoles	10
1.3.3.2. Pesticidas.....	11

1.3.3.3. Colorantes	11
1.3.3.3.1. Naranja (II)	11
1.3.3.3.2. Aplicaciones	12
1.3.3.3.3. Efectos a la salud y medio ambiente	12
1.4. Agua activada	12
1.4.1. Aplicaciones del agua activada	12
1.4.2. Tipos de agua activada	13
1.4.2.1. Agua activada por plasma frío	13
1.4.2.2. Plasma y su aplicación	14
1.4.2.3. Características del plasma	15
1.4.2.4. Fundamentos del plasma y su clasificación	15
1.4.2.5. Propiedades fisicoquímicas del agua activada por plasma frío	16
1.4.2.5.1. pH	16
1.4.2.5.2. Conductividad eléctrica	16
1.4.2.5.3. Producción de peróxido de hidrógeno	16
1.4.2.5.4. Salinidad y total de sólidos disueltos	17
1.4.2.6. Agua activada a través de agentes oxidantes	17
1.4.2.7. Procesos de oxidación avanzada y su aplicación	17
1.4.2.8. Clasificación de los procesos de oxidación avanzada	18
1.4.3. Sistema de tratamiento de activación del agua	19
1.4.4. Fase biológica (Reactor DBD)	19
1.4.5. Fase química (Reactor tipo <i>batch</i>)	20
Capítulo 2	19
Desarrollo Experimental	19
1.1. Descripción general de las actividades realizadas	20
2.2. Material y equipo	23
2.2.1. Preparación de muestras de agua activada por plasma	23
2.2.2. Preparación de cultivos	24
2.2.3. Experimentación de laboratorio	30

2.2.4. Pruebas microbiológicas.....	30
2.2.5. Caracterización del agua activada por plasma	31
2.3. Procedimiento para la determinación de ozono.....	32
2.4. Procedimiento para la determinación de peróxido de hidrógeno	32
2.5. Descripción general de las actividades realizadas en fase química.	33
2.6. Material y equipo	34
2.6.1. Preparación de muestras de agua activada a través de agentes oxidantes ...	34
2.6.2. Experimentación de laboratorio	38
2.6.3. Pruebas fisicoquímicas	38
2.6.4 Caracterización del agua activada químicamente	39
2.6.5. Procedimiento para la determinación de dióxido de carbono	40
Capítulo 3.....	41
Resultados y discusión.....	41
3.1. Tratamiento de <i>Staphylococcus aureus</i>	42
3.2. Tratamiento de <i>Escherichia coli</i>	49
3.3. Tratamiento de <i>Salmonella typhimurium</i>	51
3.4. Caracterización del agua activada por plasma frío	53
3.5. Obtención de resultados para tratamiento de Naranja (II)	57
3.6. Tratamiento de Naranja (II) con agua activada a través de agentes oxidantes	58
3.6 Caracterización del agua activada a través de agentes oxidantes.....	65
Conclusiones	73
Recomendaciones.....	76
Referencias	84

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama general del desarrollo experimental.	Pág. 20
Figura 2. Esquema del reactor de Descargas de Barrera Dieléctrica (DBD).	Pág. 23
Figura 3. Sistema de caracterización de propiedades fisicoquímicas del agua activada por plasma.	Pág. 31
Figura 4. Realización del HI38054 Ozone Test Kit de HANNA® instruments.	Pág. 32
Figura 5. Muestra de agua activada por plasma con una concentración de 1.50 ppm de peróxido de hidrógeno.	Pág. 33
Figura 6. Sistema de tratamiento y toma de propiedades fisicoquímicas del agua activada químicamente.	Pág. 39
Figura 7. Supervivencia de la bacteria <i>Staphylococcus aureus</i> a una concentración inicial de 10^3 UFC/mL con agua activada por plasma a un ciclo.	Pág. 42
Figura 8. Supervivencia de la bacteria <i>Staphylococcus aureus</i> a una concentración inicial de 10^3 UFC/mL con agua activada por plasma a dos ciclos.	Pág. 43
Figura 9. Supervivencia de la bacteria <i>Staphylococcus aureus</i> a una concentración inicial de 10^3 UFC/mL con agua activada por plasma a tres ciclos.	Pág. 44
Figura 10. Supervivencia de la bacteria <i>Staphylococcus aureus</i> a una concentración inicial de 10^3 UFC/mL con agua activada por plasma a cuatro ciclos.	Pág. 45
Figura 11. Supervivencia de la bacteria <i>Staphylococcus aureus</i> a una concentración inicial de 10^3 UFC/mL con agua activada por plasma a cinco ciclos.	Pág. 46

Figura 12. Supervivencia de la bacteria <i>Staphylococcus aureus</i> a una concentración inicial de 10^4 UFC/mL con agua activada por plasma a cuatro ciclos.	Pág. 47
Figura 13. Supervivencia de la bacteria <i>Staphylococcus aureus</i> a una concentración inicial de 10^4 UFC/mL con agua activada por plasma a cinco ciclos.	Pág. 48
Figura 14. Supervivencia de la bacteria <i>Escherichia coli</i> a una concentración de 10^4 UFC/mL con agua activada por plasma a tres ciclos.	Pág. 49
Figura 15. Supervivencia de la bacteria <i>Escherichia coli</i> a una concentración de 10^4 UFC/ mL con agua activada por plasma a cuatro ciclos.	Pág. 50
Figura 16. Supervivencia de la bacteria <i>Salmonella typhimurium</i> a una concentración de 10^4 UFC/mL con agua activada por plasma a cuatro ciclos.	Pág. 51
Figura 17. Supervivencia de la bacteria <i>Salmonella typhimurium</i> a una concentración de 10^4 UFC/mL con agua activada por plasma a cinco ciclos.	Pág. 52
Figura 18. Prueba de ozono en una muestra de agua destilada en T0.	Pág. 54
Figura 19. Prueba de ozono en una muestra de agua activada por plasma a cinco ciclos en T0.	Pág. 55
Figura 20. Prueba de ozono en una muestra de agua activada por plasma a cinco ciclos en T5.	Pág. 55
Figura 21. Prueba de peróxido de hidrógeno en una muestra de agua destilada en T0 (a), muestra de agua activada por plasma a cinco ciclos T0 (b) y muestra de agua activada por plasma a cinco ciclos en T5 (c).	Pág. 56

Figura 22. Porcentaje de eficiencia del tratamiento de agua activada químicamente con 0.5 mL de H₂O₂, aplicación de ozono y UV durante una hora con una concentración de 20 ppm de Naranja (II).	Pág. 58
Figura 23. Porcentaje de eficiencia del tratamiento de agua activada químicamente con aplicación de ozono durante una hora con una concentración de 20 ppm de Naranja (II).	Pág. 59
Figura 24. Porcentaje de eficiencia del tratamiento de agua activada químicamente con 1 mL de H₂O₂, aplicación de ozono y UV durante una hora con una concentración de 20 ppm de Naranja (II).	Pág. 60
Figura 25. Porcentaje de eficiencia del tratamiento de agua activada químicamente con 1.5 mL de H₂O₂, aplicación de ozono y UV durante una hora con una concentración de 20 ppm de Naranja (II).	Pág. 61
Figura 26. Porcentaje de eficiencia del tratamiento de agua activada químicamente con 1.5 mL de H₂O₂, aplicación de ozono y UV durante una hora con una concentración de 20 ppm de Naranja (II). (<i>In situ</i>).	Pág. 62
Figura 27. Porcentaje de eficiencia del tratamiento de agua activada químicamente con 1 mL de H₂O₂, aplicación de ozono y UV durante una hora con una concentración de 20 ppm de Naranja (II). (<i>In situ</i>).	Pág. 63
Figura 28. Toma de concentración de peróxido de hidrógeno de una muestra de agua químicamente activada.	Pág. 66
Figura 29. Muestras de agua activada químicamente, (A la izquierda se ve la muestra antes de la prueba de concentración de dióxido de carbono, a la derecha la muestra después de la prueba de concentración de dióxido de carbono).	Pág. 67

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Clasificación del tipo de microorganismos.	Pág. 5
Tabla 2. Clasificación del tipo de bacterias según su forma.	Pág. 7
Tabla 3. Clasificación del tipo de procesos de oxidación avanzada.	Pág. 18
Tabla 4. Reactivos utilizados para la elaboración de medio de cultivo.	Pág. 26
Tabla 5. Material y equipo utilizado para el desarrollo del experimento.	Pág. 27
Tabla 6. Cepas utilizadas en el desarrollo del experimento.	Pág. 29
Tabla 7. Reactivos utilizados para el experimento en fase química.	Pág. 35
Tabla 8. Material y equipo utilizado para el experimento en fase química.	Pág. 36
Tabla 9. Parámetros evaluados de una muestra de agua activada por plasma.	Pág. 53
Tabla 10. Resultados obtenidos del porcentaje de eficiencia del tratamiento.	Pág. 64
Tabla 11. Parámetros evaluados de una muestras de agua químicamente activada en 6 experimentos distintos.	Pág. 65
Tabla 12. concentración de peróxido de hidrógeno (H₂O₂) en una muestra de agua químicamente activada en 6 experimentos diferentes.	Pág. 66
Tabla 13. Concentración de dióxido de carbono (CO₂) en una muestra de agua químicamente activada en 6 experimentos diferentes.	Pág. 67

RESUMEN

Los procesos de oxidación avanzada y su aplicación como tecnologías de innovación son una alternativa a tratamientos de contaminantes emergentes como colorantes de compleja composición y de microorganismos vulnerables a la oxidación. En el presente trabajo se hace uso de ellas para el tratamiento de agua activada por plasma frío en fase biológica (*Staphylococcus aureus*, *Escherichia coli* y *Salmonella typhimurium*) y agua activada a través de agentes oxidantes para la fase química (Naranja (II)).

El agua activada por plasma frío se presenta como una tecnología emergente de desinfección, efectiva para alimentos, superficies contaminadas, materiales hospitalarios y piezas dentales hasta como método de tratamiento para infecciones. Su evaluación teórica y experimental de ésta en la desactivación de bacterias comunes como: *Staphylococcus aureus*, *Escherichia coli* y *Salmonella typhimurium* a través del efecto del agua previamente activada por plasma frío presentó resultados en porcentaje de hasta un 97% (en algunos casos) de efectividad en la desactivación bacteriana al tratar una concentración inicial de 1×10^3 UFC/mL (unidades formadoras de colonias por mililitro, término usado en microbiología para indicar la cantidad de microorganismos vivos en un medio líquido), demostrando que el agua activada por plasma frío puede ser empleada como método de desinfección eficaz de materiales, superficies, alimentos, entre otros, contaminados por bacterias como *Staphylococcus aureus*, *Escherichia coli* y *Salmonella typhimurium*. A su vez, se efectuó su caracterización fisicoquímica y su efecto medido en porcentaje de supervivencia de bacterias.

Mientras que la activación de agua, a través de la combinación de agentes oxidantes (ozono, peróxido de hidrógeno y UV) se muestra factible en la degradación de contaminantes de compleja estructura como en Naranja (II) tras la generación de radicales OH en el tratamiento, logrando un 99% de eficiencia en un tratamiento *in situ* sobre un 13% en tratamiento *ex situ*, a su vez efectuando la caracterización fisicoquímica del agua activada en fase química.

La activación de agua permite estudiar la formación de especies disueltas como las especies reactivas de oxígeno (ROS) y especies reactivas de nitrógeno (RNS) en medio líquido causantes de la desnaturalización en la composición del microorganismo y colorante lo que le atribuye propiedades microbicidas y de degradación.

Palabras clave: Procesos de oxidación avanzada, Contaminantes emergentes, Bacterias, Agua activada, Agentes oxidantes, Desactivación, Degradación.

ABSTRACT

Advanced oxidation processes and their application as innovative technologies are an alternative for treating emerging pollutants such as complex dyes and bacteria susceptible to oxidation. This study utilizes these processes for the treatment of plasma-activated water in the biological phase and chemically activated water for the chemical phase (referencing the pollutant).

Plasma-activated water is presented as an emerging disinfection technology, effective for food, contaminated surfaces, hospital materials, and dental items, as well as a treatment method for infections. The theoretical and experimental evaluation of this method for inactivating common bacteria on surfaces, such as *S. aureus*, *E. coli*, and *S. typhimurium*, using cold plasma or non-thermal plasma-activated water showed results of up to 97% effectiveness in bacterial deactivation when treating an initial concentration of 1×10^3 CFU/mL. This demonstrates that plasma-activated water can be used as an effective disinfection method for materials, surfaces, and food contaminated with bacteria like *S. aureus*, *E. coli*, and *S. typhimurium*. In turn, its physicochemical characterization was carried out and its effect measured in percentage of bacterial survival.

On the other hand, chemically activated water, through the combination of oxidizing agents (ozone, hydrogen peroxide, and UV), proves feasible in degrading complex structure pollutants like methyl orange after generating OH radicals during treatment, achieving 99% efficiency *in situ* compared to 13% in *ex situ* treatment, along with the physicochemical characterization of the chemically activated water.

The activation of water allows for the study of the formation of dissolved species such as reactive oxygen species (ROS) and reactive nitrogen species (RNS) in the liquid medium, which cause denaturation in the composition of microorganisms and dyes, imparting microbicidal and degradative properties.

Keywords: Advanced oxidation processes, Emerging pollutants, Bacteria, Activated water, Oxidizing agents, Deactivation, Degradation.

INTRODUCCIÓN

El aumento creciente de zonas industriales y urbanizadas conlleva a una mayor explotación de recursos hídricos, un problema común a la fecha, y la generación de aguas residuales con presencia de contaminantes resulta en efectos negativos para todo un sistema que depende del agua. Las actividades industriales, textiles, farmacéuticas y humanas generan la aparición de colorantes y microorganismos en el agua.

La presencia y resistencia de microorganismos es un aspecto natural de evolución, mostrando así su adaptabilidad, progresión y resistencia bacteriana, sin embargo, no se puede decir lo mismo de la presencia de colorantes, puesto que su alta solubilidad interfiere en el deterioro de los sistemas acuáticos, si bien no son aspectos positivos, la evolución de los microorganismos resulta de manera natural mientras que la persistencia de los colorantes resulta de la fabricación humana de ellos.

La aplicación de procesos de oxidación avanzada como tratamiento a la degradación o total eliminación de contaminantes es altamente eficaz, generando cambios en las estructuras químicas por medio de la generación de especies reactivas.

En este proyecto se pretende tomar como método de tratamiento de la fase biológica (*Staphylococcus aureus*, *Escherichia coli* y *Salmonella typhimurium*) al uso de plasmas fríos como proceso de oxidación avanzada no fotoquímico para activar agua y ser utilizada como método de desinfección y desactivación de microorganismos, dado que el agua activada por plasma frío contiene una diversidad de especies químicas reactivas que presentan un gran potencial de desinfección y desactivación de microorganismos.

Mientras que en la fase química (Naranja (II)) el método de tratamiento a través del uso de agentes avanzados de oxidación como el ozono, peróxido de hidrógeno y UV pretende ser usado ante contaminantes como colorantes, implicando una reacción de alta velocidad y potencial de oxidación por medio fotoquímico.

Planteamiento del problema, Justificación, Hipótesis y Objetivos

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La aplicación de colorantes en los distintos sectores ha provocado su presencia en los ecosistemas acuáticos, derivado de las enormes cantidades de aguas residuales vertidas sobre estos, perjudicando significativamente la calidad de las aguas, problemas de fotosíntesis e inhibición de flora acuática, promoviendo la toxicidad, mutagenicidad y en algunos casos la carcinogenicidad.

La industria textil es una de las mayores industrias a nivel mundial y es una parte importante de la economía de muchos países. El proceso de fabricación no solo requiere del uso de productos químicos sino además se consumen grandes cantidades de agua, lo que trae como consecuencia la generación de grandes volúmenes de aguas residuales de diversa y compleja composición (López, 2017).

Las aguas residuales que contienen colorantes deben ser tratadas antes de ser vertidas al medio, sin embargo, la presencia de algunos colorantes suele resultar en problemas debido a su compleja composición, lo que dificulta su remoción del agua.

En la última década, el aumento de infecciones causadas por bacterias implica consecuencias graves de infección, por lo que actualmente suponen un gran problema de salud a nivel mundial (Fariñas & Martínez, 2013). Ahora bien, el aumento de estas infecciones resulta en un gran problema cuando los microorganismos presentan resistencia a los diferentes tratamientos con medicamentos o a métodos convencionales de desinfección, lo que lo alterna a la aplicación de medicamentos y productos más costosos y en su caso hasta agresivos.

Un ejemplo de los patógenos más comunes en infecciones son *Staphylococcus aureus*, *Escherichia coli* y *Salmonella typhimurium* provocando alrededor de un 90% de las infecciones en humanos, destacando la resistencia de las cepas a múltiples antibióticos generando dificultades en el tratamiento, por lo que ha sido necesario plantear soluciones o tratamientos funcionales ante tales casos. De esta manera, y con el estudio actual a las alternativas, se ha planteado el uso de plasmas fríos para la desactivación de bacterias debido a la generación de especies reactivas de

oxígeno (ROS) y especies reactivas de nitrógeno (RNS) generadas a través de descargas eléctricas en agua.

JUSTIFICACIÓN

En los últimos años, el tratamiento de diversas enfermedades infecciosas, como las heridas en la piel y las membranas mucosas, se ha vuelto más complicado e ineficaz debido a las bacterias resistentes a los medicamentos. Cuando no es suficiente tratar infecciones con antibióticos de primera línea, se deben aplicar medicamentos más agresivos y costosos.

Estudios recientes han propuesto que diversos procesos avanzados de oxidación como tecnologías prometedoras para la desactivación de bacterias debido a la generación de especies reactivas de oxígeno (ROS) y de nitrógeno (RNS).

El agua activada propicia la formación de especies químicas altamente reactivas u oxidantes. Esta característica le ha conferido ciertas propiedades que se han puesto en diversas aplicaciones para la industria agrícola y alimentaria, incluido el tratamiento, la desinfección y el almacenamiento de productos alimenticios con ahorro en costos. El agua activada se puede usar para obtener líquidos altamente activos como soluciones antibacterianas, antifúngicas y en determinado momento como terapia médica para combatir infecciones.

Ante la problemática ambiental que contraen los efluentes industriales y los nuevos estándares de la NOM-001-SEMARNAT-2021, se pretende dar una opción de tratamiento a las aguas residuales con color y con presencia de microorganismos como el *Escherichia coli* a través de los procesos de oxidación avanzada comúnmente utilizados en la degradación de materia orgánica a través de radicales hidroxilos (OH) hasta lograr una conversión menos agresiva con el medio.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

- Evaluar experimentalmente el efecto del agua activada obtenida por procesos de oxidación avanzada en la desactivación de bacterias y degradación de contaminantes químicos tales como los colorantes.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Obtener agua activada químicamente y efectuar su caracterización fisicoquímica.
- Evaluar la efectividad del agua activada químicamente en la desactivación bacteriológica.
- Evaluar la efectividad del agua activada químicamente en la degradación de contaminantes químicos como el colorante Naranja (II).

HIPÓTESIS

La aplicación de procesos de oxidación avanzada fotoquímicos y no fotoquímicos en la activación de agua propicia la desactivación y degradación de contaminantes biológicos y químicos. Así mismo, la generación de agua activada mediante plasma no térmico conlleva a la generación de especies químicas activas que generan la desactivación de bacterias.

Capítulo 1.

Generalidades

1.1. Agua

El agua es el líquido vital para el desarrollo de la vida humana y de actividades necesarias para esta, Fernández (2012) afirma que el agua es “La fuente y sustento de la vida, contribuye a regular el clima del mundo y con su fuerza formidable modela la Tierra” (p. 148). Se encuentra en estado sólido (hielo, nieve, glaciares y cubre las regiones más frías del planeta), en estado líquido cubriendo tres cuartas partes de la superficie de la tierra (en arroyos, ríos, lagunas, mares y cuerpos de agua subterráneos) y de forma gaseosa (en el aire en forma de vapor). Químicamente formada por dos átomos de hidrógeno unidos a un átomo de oxígeno (H_2O).

1.1.1. Tipos de agua

Los tipos de agua se clasifican en función de sus características:

- a) Agua para uso y consumo humano: toda aquella que no causa efectos nocivos a la salud y que no presenta contaminantes en concentraciones fuera de los límites permisibles y que no proviene de aguas residuales tratadas.
- b) Agua dulce: Aquella que contiene un máximo del 0.5 % de sales disueltas de toda el agua en la Tierra.
- c) Agua salada: Es el efluente que contiene una alta concentración de sales minerales disueltas.
- d) Agua destilada: Aquella que está libre de minerales, microorganismos y otros contaminantes, ideal para su uso industrial u hospitalario.

1.1.2. Propiedades fisicoquímicas del agua

El punto de fusión y ebullición del agua a presión normal es considerado como $0^{\circ}C$ (en el caso de fusión) y $100^{\circ}C$ como punto de ebullición; la densidad del agua se establece como 1 g/cm^3 o 0.99999 g/cm^3 a una temperatura de $20^{\circ}C$ y al aumentar su temperatura de $0^{\circ}C$ a $4^{\circ}C$ alcanza su máximo valor de 1 g/cm^3 . “La mayoría de las sustancias tienden a expandirse tras elevar su temperatura y se contraen cuando se enfrían, por lo tanto, el agua se rige por este comportamiento comenzando a expandirse a partir de los $4^{\circ}C$ ” (López, Romano & Triana, 2005, p. 8).

El agua es la única sustancia capaz de encontrarse en los tres estados de la materia, carece de sabor, color y olor, se encuentra en un cambio y movimiento constante o lo que se conoce como el ciclo del agua, moviéndose entre la atmósfera y la superficie a través de la evaporación y precipitación, deshielo, escorrentías y flujos de agua o infiltraciones y recargas de aguas subterráneas.

Este elemento destaca por su propiedad de absorber grandes cantidades de calor antes de aumentar su temperatura lo que lo hace un eficiente enfriador en la industria.

Dentro de sus propiedades es considerada el solvente universal debido a su naturaleza de disolver una variedad de sustancias. Tiene un pH neutro de 7, lo que indica que no es ácida y mucho menos básica y esta participa en varias reacciones químicas.

1.1.3. Aplicaciones del agua

La forma en la que el ser humano se beneficia del agua es muy variada, desde su consumo en el hogar como bebida líquida, su uso en la cocina e higiene de alimentos y misma del ser humano, hasta su uso en la industria para el desarrollo de actividades necesarias para la producción de artículos para el beneficio humano. Los usos principales dentro de la industria destacan la producción de vapor para la refrigeración de máquinas y lavado de materiales. Es necesario mencionar su uso principal en la agricultura, como fuente de riego y consumo de siembra y ganado.

De acuerdo con la CONAGUA (2019) en México se tienen identificados 13 usos del agua, entre ellos se destaca el consumo en sectores agrícolas, acuacultura, pecuario, comercio, doméstico, industrial, agroindustrial y público-urbano.

1.2. Contaminación del agua

La contaminación del agua puede ser definida como la introducción de sustancias u organismos que no pertenezcan, alteren el estado natural y degraden su calidad. Desafortunadamente un gran volumen del total de las aguas disponibles para consumo humano hoy día se encuentran alteradas física, química y biológicamente,

cambiando sus propiedades iniciales durante su uso, ocasionando un daño para los seres que dependen de ella para vivir, consumir y desarrollar actividades.

Los principales contaminantes del agua incluyen aguas residuales, productos derivados del petróleo, nitratos, insecticidas, sedimentos y exceso de materia orgánica y productos químicos. Endara (2020) comparte la idea de que “La contaminación del agua afecta órganos vitales del cuerpo, sistemas nerviosos, y provocan diferentes tipos de cánceres, efectos cardiovasculares, entre otros.” (p. 91). Por ende, el control de estas consecuencias están en cada uno de los consumidores.

1.3. Tipos de contaminantes del agua

De manera general se describen los tipos de contaminantes que influyen en la contaminación del agua según su fuente o desarrollo de actividad del que pueden provenir.

1.3.1. Biológicos

Los contaminantes biológicos hacen referencia a la presencia de microorganismos en cuerpos de agua por origen humano o animal. La existencia de agentes biológicos en el agua es causada por el desecho de aguas residuales a cuerpos de agua sanos.

En artículos como el de Martínez, D. V. S. (2021) se expresa la amenaza en la seguridad del consumo de agua potable, dado que riesgos ambientales como la contaminación industrial, doméstica y agrícola en regiones como Tlaxcoapan, Hidalgo, hace a la población vulnerable de contraer enfermedades intestinales por contaminantes biológicos.

Un microorganismo es un ser vivo de pequeño tamaño cuya observación se puede realizar a través de un microscopio óptico, su participación en los diferentes procesos metabólicos, ecológicos y biotecnológicos los hacen fundamentales para el funcionamiento y mantenimiento de la vida en la Tierra.

Los tipos de microorganismos se clasifican de la siguiente manera:

Tabla 1. Clasificación del tipo de microorganismos.

Tipos de microorganismos		
Microorganismos con organización celular: Poseen membrana celular Tienen ADN y ARN	Procariotas	Arqueobacterias Eubacterias
	Eucariotas	Protozoos Algas microscópicas Hongos microscópicos
Microorganismos sin organización celular: No poseen membranas Carecen de metabolismo No pueden presentar los dos ácidos nucleicos juntos.		Virus Viroides Priones

1.3.1.1. Virus

Según Brooks et al., (2014), los virus no tienen núcleo, citoplasma, mitocondrias u otros organelos celulares, por lo que al replicarse requieren de células vivas donde actúan como parásitos a nivel genético; es decir, no podrán reproducirse sin la presencia de células hospedadoras, de las cuales ocupará su proceso de replicación para generar nuevas estructuras víricas.

Actualmente en diversos estudios se evalúa la reducción significativa de la capacidad infecciosa de los virus, y a su vez inhiben la replicación en las células previamente infectadas sin generar daños, a través de la aplicación de agua activada por plasma frío y su capacidad de producir especies reactivas de oxígeno y nitrógeno con propiedades antimicrobianas en diferentes superficies sin problemas de acceso gracias a sus diferentes métodos de aplicación.

1.3.1.2. Hongos

Las personas, alimentos, superficies, entre otros, que se ven expuestas a fuentes de agua contaminadas por hongos, producto de lluvias e inundaciones, son

susceptibles a presentar infecciones o enfermedades por contacto y consumo que pueden ser dañinos para el organismo.

1.3.1.3. Bacterias

Las bacterias, por lo tanto, son microorganismos procariotas de diversas formas en las que se incluyen filamentos, esferas (cocos), barras (bacilos), sacacorchos (vibrios) y hélices (espirilos); pueden ser de carácter patógeno o no, poseen pared celular compuesta de peptidoglicanos, polímeros estructurales que envuelven las células bacterianas constituidos de azúcares y aminoácidos, no tienen núcleo definido.

Existen bacterias no patógenas que contribuyen en los ciclos de la tierra como el ciclo del nitrógeno y el ciclo del carbono, indispensables para mantener el equilibrio biológico. Las bacterias no patógenas incluso pueden ser utilizadas en procesos industriales alimenticios y químicos, en los que su papel principal es la síntesis de vitaminas y antibióticos, sin embargo, algunas de las enfermedades existentes son causadas por bacterias de carácter patógeno, contaminando alimentos y produciendo enfermedades infecciosas debido al hecho de que liberan toxinas que pueden llegar a invadir tejidos y desencadenar prejuicios a la salud.

Los tipos de bacterias se clasifican de la siguiente manera en función de su forma:

Tabla 2. Clasificación del tipo de bacterias según su forma.

Tipos de bacterias		
Cocos	Bacilos	Espirilos y vibrios
Son de forma redonda. Viven en medios ricos de nutrientes. Se transmiten por el aire. Suelen ser muy resistentes. Suelen ser de carácter patógeno.	Forma alargada y cilíndrica. Viven en medios pobres de nutrientes como suelos y aguas. Son menos resistentes.	Tienen forma de hélice. Viven en medios viscosos. Son de pequeño diámetro. Atraviesan fácilmente las mucosas. Patógenas por contacto directo.

A pesar de los avances en técnicas de desinfección y tratamientos a bacterias de carácter patógeno, las complicaciones postoperatorias siguen siendo una fuerte debilidad clínica significativa a la que se enfrentan los médicos y los pacientes, dado que la relación entre las infecciones y la causa de heridas abiertas en la piel significa un área oportuna para que el microorganismo penetre y se mueva a través de los tejidos propiciando a una fuerte contaminación del área, creando condiciones adecuadas para su supervivencia.

Bien, es importante mencionar que para que exista una contaminación es necesaria la presencia de microorganismos en la superficie del cuerpo humano funcionando como una especie de cubierta sobre el interior o exterior de la piel con un depósito de gérmenes patógenos, mientras que la infección hace mención a la reproducción de los microorganismos en los tejidos con la capacidad de inducir inflamación como

respuesta y las principales bacterias que originan este tipo de problemas son la *Staphylococcus aureus*, *Salmonella typhimurium* y *Escherichia coli*.

1.3.1.3.1. *Staphylococcus aureus*

El género *Staphylococcus* está formado por cocos *Gram positivos* que pueden agruparse en racimos. Son bacterias no móviles que no poseen cápsula, lo que los hace particularmente resistentes contra los antibióticos, lo que representa dificultad a su tratamiento. En los humanos causa una amplia variedad de enfermedades infecciosas y su principal impacto radica en su resistencia. Este tipo de bacterias tiene una gran capacidad de adaptación y fácil propagación lo que la convierte en la principal causa de infecciones e intoxicaciones por alimentos y heridas en la piel por procesos quirúrgicos.

El *Staphylococcus aureus* según Hernández et al., (2005) es:

El causante de un gran número de infecciones graves como infecciones por heridas, septicemias, endocarditis y osteomielitis, que habitualmente generan síntomas como dolor de pecho, dificultad para respirar, fatiga, fiebre, escalofríos, erupciones cutáneas y heridas que no logran sanar (p. 143).

1.3.1.3.2. *Salmonella typhimurium*

Los microorganismos del género *Salmonella* son bacilos *Gram negativos*, son móviles debido a la presencia de flagelos, se hallan ampliamente distribuidos en la naturaleza y se encuentran en el tracto gastrointestinal de los mamíferos domésticos y salvajes, reptiles, aves e insectos. La salmonelosis es causada por una gran cantidad de especies del género *Salmonella* y es adquirida por vía oral al ingerir bebidas y comidas contaminadas.

Según Kopper et al., (2009) además de ingerir alimentos contaminados, la enfermedad en el humano se produce por contacto directo con agentes previamente infectados como animales o sus excreciones, y al igual que *Staphylococcus aureus* se puede manifestar con bacteremia con síntomas de fiebre, cefalea, malestar general y escalofríos.

1.3.1.3.3. *Escherichia coli*

Escherichia coli es una bacteria habitual del tracto gastrointestinal de los animales y humanos, sin embargo, hoy día algunas cepas han adaptado capacidades para producir diarrea y varias enfermedades intestinales. Es un bacilo *Gram negativo* y sus principales síntomas se desarrollan en diarrea, vómitos y malestar general. “*E. coli* es encontrada en áreas críticas, así como, en otros sitios hospitalarios, instituciones asociadas al cuidado de la salud y más comúnmente en la comunidad” (García & Gómez, 2019, p. 18).

1.3.2. Emergentes

Los contaminantes emergentes pueden ser sustancias químicas o materiales que presenten un riesgo para el medio ambiente y a la salud humana, entre ellos se considera a los fármacos de uso humano o veterinario, plaguicidas, antioxidantes, plastificantes, detergentes, cosméticos. Es importante mencionar que la principal fuente de contaminantes emergentes es emitida por las industrias y sus descargas de aguas residuales, sin embargo, se le atribuye también al sector ganadero ya que suelen utilizar antibióticos para su ganado y al sector agrario por el uso de pesticidas, mismos que son vertidos en sus cultivos.

Urbina & Solano (2020) define a los contaminantes emergentes como:

También llamados microcontaminantes, son compuestos químicos producto de las actividades humanas que se realizan en el diario vivir, como la higiene personal o el cuidado de la salud, que pueden provocar efectos negativos en el ecosistema, generando alteraciones sobre el medio ambiente (p. 251).

1.3.3. Orgánicos e inorgánicos

La presencia de contaminantes inorgánicos en el agua se originan de las descargas de aguas residuales domésticas, agrícolas e industriales (como el arsénico, el plomo y los nitratos). La mayor parte de los contaminantes inorgánicos se mantienen solubles y si estas aguas tienen un pH bajo es posible que los metales puedan disolverse en ellas. Pabón et al., (2020) dice que “Actualmente uno de los mayores problemas a nivel ambiental es la contaminación de las fuentes hídricas del mundo

por metales pesados” (p. 9). Por otro lado, los contaminantes orgánicos se encuentran con mayor frecuencia en las aguas y se debe a la actividad industrial, puesto que con frecuencia son liberadas directa o indirectamente efluentes con carga orgánica a sistemas hídricos. Los contaminantes orgánicos son sustancias con una alta capacidad de persistir en un medio y que pueden ser tóxicamente activos, generando efectos adversos al medio en el que se liberen.

Castro & Castillo (2024) afirman que:

Los contaminantes orgánicos persistentes (COP), son sustancias químicas que suponen una amenaza para la salud humana y el medio ambiente de todo el planeta, debido a que permanecen en el medio ambiente, al ser resistentes a la degradación, son bioacumulables, se incorporan en los tejidos de los seres vivos, pudiendo aumentar de concentración, tóxicos para la salud humana y el medio ambiente y tienen potencial para transportarse a larga distancia (p. 137). Algunos de estos contaminantes pueden ser plásticos, plaguicidas, petróleo, gasolina, fenoles, organismos coliformes totales y colorantes.

1.3.3.1. Fenoles

El fenol es un compuesto químico aromático derivado del benceno; es un sólido blanco o incoloro muy soluble en agua e inflamable, presenta un olor fuerte y dulce y tiende a evaporarse más lento que el agua. El fenol y sus derivados son la unidad estructural básica en una amplia variedad de compuestos orgánicos sintéticos (Quispe & Pinazo, 2021, p. 16).

Es usado como materia prima en un sinnúmero de procesos farmacéuticos, entre ellos la producción del ácido acetilsalicílico o antisépticos para combatir el acné, en la manufactura de nylon y como agente desinfectante de bacterias y hongos. Su prolongada exposición puede producir efectos crónicos como convulsiones, dolor de cabeza, mareos, náuseas y daños al hígado, corazón, pulmones y riñones.

1.3.3.2. Pesticidas

Según Zarzuela (2021) el uso de pesticidas de manera general va en aumento durante los últimos años y con ello una serie de consecuencias, afectando drásticamente al medio ambiente, encontrando residuos en el agua y suelo.

Cualquier sustancia elaborada con el fin de controlar, matar o repeler una plaga es un pesticida. Son utilizados en la agricultura y pueden ser específicos para algas, gérmenes, hongos, malezas, insectos y roedores. Su presencia en el agua desemboca de las escorrentías de lluvia sobre la tierra, transportando así las sustancias químicas y otros contaminantes al agua, alterando ecosistemas, flora y fauna.

1.3.3.3. Colorantes

De acuerdo con autores como Martínez, et al., (2014) la industria textil es una de las fuentes de empleo más importantes en el país, sin embargo, este sector es uno de los principales consumidores de agua y generador de aguas residuales, dentro de los compuestos de sus vertidos se encuentran contaminantes de compleja composición como los colorantes, diseñados para ser altamente resistentes a la degradación, por lo que su eliminación en plantas de tratamiento convencionales puede resultar difícil.

Los colorantes son sustancias orgánicas o inorgánicas que ceden color a otras sustancias o tejidos, modificando o no su estructura química, son solubles en el medio donde se aplican y se clasifican por su origen:

- a) Colorantes naturales: Proviene de origen animal o vegetal.
- b) Colorantes sintéticos: Son de origen mineral.

1.3.3.3.1. Naranja (II)

En la actualidad, gran parte de los colorantes son de estructuras complejas, variadas y de origen sintético, solubles en agua y poco biodegradables. “El Naranja (II) con fórmula molecular $C_{16}H_{11}N_2NaO_4S$ es un colorante con grupo funcional azo ($N=N$) que da un color brillante” (QUÍMICA SUASTES, S.A. DE C.V., 2018, p. 1).

1.3.3.3.2. Aplicaciones

Según QUÍMICA SUASTES, S.A. DE C.V. (2018) el Naranja (II) es utilizado en análisis de sustancias químicas y farmacéuticas, ya que muchas requieren ser tituladas; su función como indicador de pH ayuda, en este caso en sustancias ácidas debido a su cambio de color de rojo a naranja-amarillo de 3.1 a 4.4. Como colorante textil, debido a su propiedad de teñir sustratos como el algodón en tejidos de seda y lana, papel y tinta, su aplicación dentro de la industria maderera lo hace uno de los principales colorantes a usar en sus procesos.

1.3.3.3.3. Efectos a la salud y medio ambiente

El Naranja (II) presenta efectos irritantes tras su contacto directo con la piel y mucosas, es tóxico por inhalación o ingestión. Puede ser tóxico para el medio acuático, puede causar efectos adversos a largo plazo, en grandes cantidades puede afectar el pH del agua con riesgo de efectos nocivos para los organismos acuáticos (QUÍMICA SUASTES, S.A. DE C.V., 2018, p. 11).

1.4. Agua activada

El agua activada hace referencia al agua sometida a un proceso físico o químico para adquirir propiedades distintas a las que originalmente tendría y adoptando especies químicas reactivas que presentan un gran potencial en su aplicación, mejorando la calidad microbiológica en superficies y alimentos, así como su descontaminación, entre otros.

1.4.1. Aplicaciones del agua activada

El agua activada, tras poseer propiedades microbidas se emplea en el tratamiento médico del acné, agruras, higiene facial, quemaduras, diabetes, es usada como técnica de descontaminación microbiana en alimentos de origen animal, vegetal, crudos y procesados sin alterar su calidad, inactivando eficazmente bacterias, mohos y levaduras en frutas, verduras y semillas, a su vez desactiva patógenos usualmente encontrados en productos cárnicos y huevo como *Salmonella* y *Staphylococcus aureus*. “La tecnología de producción de agua activada por plasma también puede ser usada para purificar y/o desinfectar aguas residuales, agua para

consumo humano u otro tipo de agua que necesite ser tratada” (Celestino, 2023, p. 25).

1.4.2. Tipos de agua activada

- A) Agua alcalina: Agua ionizada que actúa como un potente y natural antioxidante con la capacidad de neutralizar ácidos, comúnmente elaborada con un equipo de electrólisis.
- B) Agua hidrogenada: Agua enriquecida con hidrógeno obtenida por electrolisis, adoptando efectos antioxidantes y antiinflamatorios en el organismo.
- C) Agua magnetizada: Agua sometida a un campo magnético que cambia las características del agua, como la temperatura, densidad, tensión superficial, viscosidad y conductividad, su uso principal destaca en la desincrustación de depósitos calcáreos en tuberías.
- D) Agua activada por plasma: se genera mediante la exposición del agua a una descarga de plasma frío, lo que provoca su enriquecimiento en especies reactivas de oxígeno y de nitrógeno confiriéndole propiedades antimicrobianas.

1.4.2.1. Agua activada por plasma frío

El agua activada por plasma frío es un método alternativo para la desinfección microbiana, producto de la reacción del plasma con el agua, formando un ambiente capaz de adoptar propiedades de desinfección microbiana por largos periodos de tiempo tras contener una diversidad de especies químicas reactivas de oxígeno y de nitrógeno con un gran potencial de hasta desactivar o reducir concentraciones de microorganismos con aplicaciones industriales, ambientales y hospitalarias.

El agua es activada tras ser expuesta directamente con el plasma durante cierto tiempo. El plasma es generado a partir de un gas ionizado, en este caso oxígeno, a través de un fuerte campo eléctrico, a presión y temperatura ambiente, lo que provoca que el gas se ionice, disocie y excite a sus átomos y moléculas, dando como resultado un agua con una gran cantidad de radicales libres y especies reactivas con un gran potencial de desinfección, debido a ello, se considera como una tecnología sumamente prometedora para mejorar la calidad microbiológica de

alimentos, descontaminación de material y superficies de contacto en la medicina y actualmente como un método de tratamiento a infecciones por bacterias en pacientes (López et al., 2019).

El papel de las especies reactivas funge como un proceso oxidativo que incluye iones de oxígeno, radicales libres y peróxidos, así como óxido nítrico, nitratos y nitritos altamente reactivos con capacidad antimicrobiana, por lo que al estar en contacto con algún microorganismo estas son capaces de desactivarlos.

1.4.2.2. Plasma y su aplicación

El plasma es llamado el cuarto estado de la materia porque, de manera general, equivale a un estado de mayor energía, es decir una sustancia fría toma una forma sólida, en donde sus átomos se encuentran unidos entre sí, por lo tanto, se dice que tiene una forma y un volumen específico, esta al ser expuesta a una temperatura mayor sus átomos adquieren movilidad por lo que la sustancia pasará a un estado líquido, en donde su forma no será definida pero el volumen sí será definido. Según Celestino (2023), si la energía térmica es incrementada aún más, esta se convertirá en un gas, perdiendo su forma y volumen definido y ahora este dependerá del recipiente que lo contenga. Cuando esta misma sustancia es sometida a mayor energía se produce un cambio nuevo en el interior de sus átomos, desprendiendo electrones a través de la ionización y se formará un plasma.

El plasma puede ser definido como un gas ionizado, casi neutro, que contiene partículas cargadas positiva o negativamente, así como neutras capaces de moverse libremente en diferentes direcciones, que cumple parámetros de operación como la temperatura o cantidad de energía cinética (energía térmica) que posee para ser utilizada.

Baeza (2017) define al plasma como “un gas altamente ionizado compuesto por electrones libres, iones positivos y negativos, radicales libres, átomos y moléculas en estado fundamental y excitado y otras especies excitadas” (p. 21).

El plasma en general es una mezcla de tres componentes: electrones libres, iones positivos y átomos (o moléculas) neutras. Por lo que es posible indicar que el

término “Plasma”, se define como “un gas parcialmente ionizado” (Bravo, 2016, p. 40).

El uso de los plasmas en la vida cotidiana es mucho más evidente de lo que se cree, pues estos se encuentran en dispositivos de iluminación como lámparas y focos de bajo consumo y algunos otros en las pantallas, tecnológicamente es usada para llevar a cabo procesos de esterilización en envasado de alimentos a través de radiación ultravioleta y cambios en la superficie de materiales, reactores termonucleares y motores de propulsión espacial.

Además, el hecho de que permitan cambiar la composición de las superficies lo hace mucho más práctico que otras tecnologías, pues sus aplicaciones industriales y en la investigación son mucho más de lo que se espera.

1.4.2.3. Características del plasma

Es un gas que ha perdido o ganado electrones a partir de cargas eléctricas (ionizado) ocurriendo entonces que sus átomos se rompan y los electrones más cercanos al exterior del átomo obtengan la suficiente energía para moverse libremente.

El plasma tiene la principal característica de fácil manipulación a través de campos magnéticos y es considerado un medio conductor eléctrico, para su producción es necesario aplicar descargas eléctricas o aplicar la energía suficiente a un sólido o líquido y producir su vaporización, contiene partículas que se encuentran en constante movimiento, pueden ser de baja temperatura y alta temperatura.

1.4.2.4. Fundamentos del plasma y su clasificación

Se hallan tres estados de la materia conocidos como sólido, líquido y gas, sabiendo cuando un sólido se calienta pasa a un estado líquido y al aplicar más temperatura esta se convierte en vapor, al aplicar una energía aun mayor este vapor (gas) es ionizado, convirtiéndolo en lo que previamente definimos como plasma que contiene especies químicas reactivas, entre ellas electrones, iones, moléculas y átomos.

Su clasificación se basa en función de su equilibrio térmico, dividiéndose en plasma térmico y plasma frío, el primero posee altas densidades electrónicas que provocan

una alta transferencia energética, haciendo que el comportamiento entre sus componentes se acerque al equilibrio térmico, considerando las temperaturas de los electrones, iones y átomos como iguales, mientras que los plasmas fríos son generados en condiciones atmosféricas normales y temperaturas ambiente, cuyas partículas están cargadas eléctricamente y que poseen especies reactivas con propiedades excepcionales de desinfección a partir de la aplicación de una descarga eléctrica.

1.4.2.5. Propiedades fisicoquímicas del agua activada por plasma frío

1.4.2.5.1. pH

Según Celestino (2023) la generación de agua activada por plasma frío da lugar a la reacción de especies químicas formadas en el plasma y agua que dan resultado a un estado de acidificación, es decir, una concentración de iones hidrógeno en la solución, conocido como pH. Si el agua en su estado más puro tiene un pH neutro, esta al ser tratada con plasma se reduce con el tiempo de exposición al tratamiento debido a la formación de peróxidos de hidrógeno y ácido nítrico que atribuyen a este fenómeno y que podría ser una de las causas más importantes de su propiedad antimicrobiana.

1.4.2.5.2. Conductividad eléctrica

Como medida de la capacidad inherente del agua para conducir el flujo de corriente eléctrica en ella. Algunos autores realizaron un estudio sobre el efecto entre el voltaje aplicado y la conductividad del agua sobre la intensidad de la radiación ultravioleta formada a partir de la descarga y notaron un aumento en la conductividad del agua y su influencia en la intensidad de la emisión de la radiación ultravioleta y a su vez observaron un aumento en la potencia radiada (Lukes et al., 2008).

1.4.2.5.3. Producción de peróxido de hidrógeno

El peróxido de hidrógeno es una especie reactiva del oxígeno formado en el agua activada por plasma y que rige el potencial microbicida en el producto, algunos métodos de evaluación y medición del peróxido de hidrógeno son: Titulación yodo

métrica, titulación de permanganato y oxalato de titanio. Diversos estudios sobre la producción de plasmas por descargas eléctricas reportan que el voltaje aplicado y la duración de las descargas aumentan linealmente la formación del peróxido de hidrógeno, sin embargo, el mecanismo por el cual se genera puede variar según los diversos sistemas, es decir, se puede esperar que el producto contenga una alta concentración de peróxido de hidrógeno (Xaubet, 2018, p. 11-35).

1.4.2.5.4. Salinidad y total de sólidos disueltos

El término salinidad hace referencia a la concentración total de sales minerales disueltas inorgánicas en el agua o suelo que tiene relación con la conductividad eléctrica ya que al aumentar estos iones ambos valores aumentarían ya que estos se encuentran relacionados entre sí. Por otro lado, los sólidos disueltos hacen referencia a cualquier sal, mineral o metal diluido en agua y se comprenden a las pequeñas cantidades de materia orgánica disuelta en agua y las sales inorgánicas, entre ellas el nitrato.

1.4.2.6. Agua activada a través de agentes oxidantes

Según López et al., (2021) los procesos de oxidación avanzada son procesos fisicoquímicos que producen cambios estructurales en contaminantes difíciles de eliminar, aumentando así su biodegradabilidad a través de la generación de radicales hidroxilo, especies de capacidad oxidante, en conjunto con reductores químicos del agua como el ozono y peróxido de hidrógeno con el fin de oxidar la materia orgánica presente.

1.4.2.7. Procesos de oxidación avanzada y su aplicación

Las aguas residuales industriales presentan una gran cantidad de contaminantes provenientes del desarrollo de su producción, actuando negativamente sobre el medio ambiente, afectando así el desarrollo natural de los ecosistemas generando un cambio de condiciones.

La efectividad de los procesos convencionales para eliminar contaminantes complejos se encuentra actualmente limitada, razón por la que se han desarrollado procesos más eficientes llamados procesos de oxidación avanzada.

Estas tecnologías se basan en procesos fisicoquímicos capaces de producir cambios en la estructura química de los contaminantes a través de la generación de especies con un alto nivel de oxidación.

La formación de especies con alto nivel de oxidación o también llamados radicales hidroxilo hace que estos procesos sean más eficientes y su generación puede acelerarse con peróxido de hidrógeno (H_2O_2), radiación ultravioleta (UV), ozono (O_3), sales de hierro (Fe^{2+}) y la aplicación de agentes catalizadores como el dióxido de titanio (TiO_2).

Dentro de sus aplicaciones destacan la reducción y eliminación de contaminantes como los pesticidas y fármacos, mejorando la calidad del agua y su reutilización y aumenta la degradación de contaminantes orgánicos e inorgánicos.

1.4.2.8. Clasificación de los procesos de oxidación avanzada

Los procesos de oxidación avanzada se pueden clasificar en procesos fotoquímicos y no fotoquímicos, se hace uso de uno u otro según las características químicas de la muestra a tratar.

Tabla 3. Clasificación del tipo de procesos de oxidación avanzada.

Procesos de oxidación avanzada	
No Fotoquímicos	Fotoquímicos
Ozonización	Fotólisis de agua en ultravioleta de vacío
Ozonización con peróxido de hidrógeno	UV y peróxido de hidrógeno
Procesos Fenton	UV y ozono
Plasmas fríos	Foto Fenton
Descargas electrohidráulica y ultrasonido	Fotocatálisis heterogénea y homogénea

Los procesos no fotoquímicos son capaces de producir compuestos altamente reactivos, mediante la transformación de especies químicas o mediante el uso de

energía (descartando la luz). En su lugar los procesos fotoquímicos utilizan como fuente de energía a la radiación de forma directa o como fuente de activación del catalizador en uso.

1.4.3. Sistema de tratamiento de activación del agua

El sistema de tratamiento de activación de aguas se divide en dos fases:

- a) Fase biológica: Se hace uso de un reactor de descarga de barrera dieléctrica para la generación del plasma, diseñado y construido por personal del Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares (ININ), en el Estado de México para producir plasma en agua o lo que se conoce como “Agua activada por plasma” a través de un reactor de flujo continuo de agua para la generación del plasma frío del tipo pulsado y se sometió el agua a un potencial de 20 kV con una frecuencia de 500 Hz, se adicionó oxígeno con un flujo de 0.5 LPM, dicho plasma durante diferentes periodos de tratamiento (ciclos) equivalentes a 1 mL/0.67 s que irán de una a cinco repeticiones.
- b) Fase química: Se hace uso de un reactor tipo *batch* para llevar a cabo la reacción, montado en las instalaciones del laboratorio de análisis instrumental en el Tecnológico de Estudios Superiores de Tianguistenco, se le adaptó el suministro continuo de ozono a través de un generador modelo GL-3189A con una salida de 600 mg/h de gas ozono, aplicación de peróxido de hidrógeno y suministro de radiación ultravioleta a través de una lámpara UV de 110 V puesto en marcha durante una hora continua.

1.4.4. Fase biológica (Reactor DBD)

Un reactor de plasma de descargas de barrera dieléctrica consta de dos electrodos separados por una barrera dieléctrica, al que se le aplica un voltaje entre los electrodos para alcanzar un potencial de ruptura del gas, de esta manera es ionizado a través de microdescargas entre uno de los electrodos y la barrera, la función de esta se basa en evitar la evolución de las microdescargas en arcos eléctricos. El uso de esta técnica para generar plasma presenta ventajas como la operación a presión atmosférica y menor voltaje de operación, por ende, menor temperatura a comparación de la requerida en procesos industriales.

1.4.5. Fase química (Reactor tipo *batch*)

Un reactor *batch* o reactor intermitente de tanque agitado, es un tanque cerrado con un agitador o agitadores cuya función es garantizar la mezcla homogénea de los reactivos, ideal para ensayos de bajo volumen, son de construcción simple, su proceso de limpieza es fácil y son ideales para reacciones en fases líquidas.

Capítulo 2.

Desarrollo

Experimental

1.1. Descripción general de las actividades realizadas

La metodología de este trabajo está dividida en dos fases, (1) fase biológica en referencia a los contaminantes tratados como *Staphylococcus aureus*, *Escherichia coli* y *Salmonella typhimurium* y (2) fase química en referencia al contaminante Naranja (II), como se muestran a continuación:

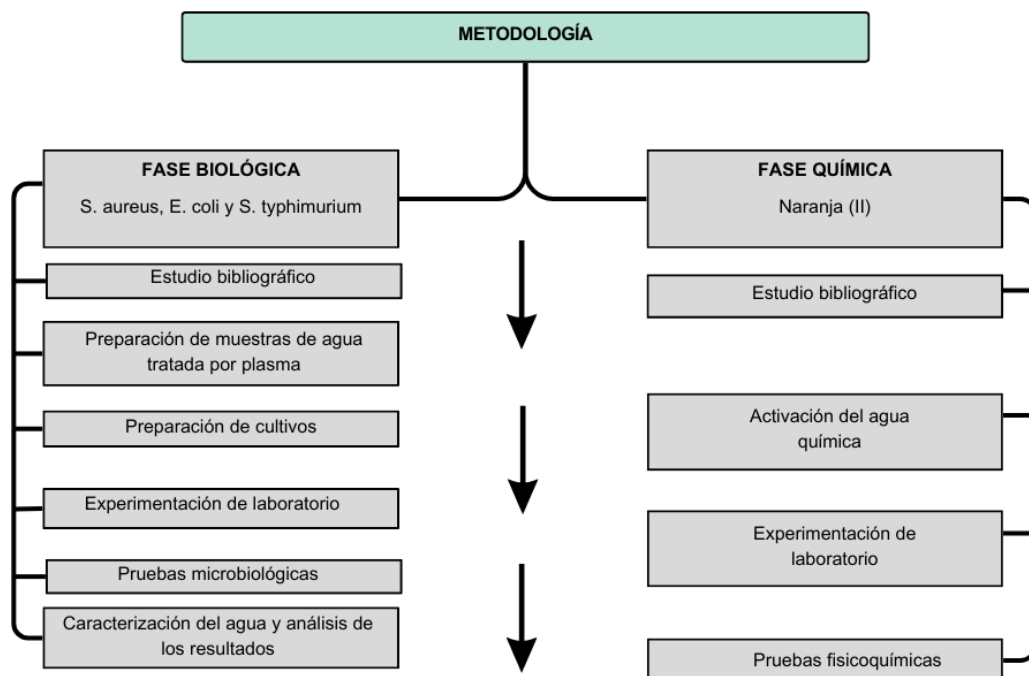


Figura 1. Diagrama general del desarrollo experimental.

Fase biológica

Estudio bibliográfico: Se realizó el estudio bibliográfico sobre la generación de agua tratada por plasmas fríos, además de realizar el sustento teórico sobre su aplicación en la desactivación bacteriana, en el que se describió a la aplicación de plasmas fríos como una de las tecnologías más investigadas durante los últimos años para sus diferentes aplicaciones como: Procesamiento de materiales, remediación ambiental y generación de ozono, en áreas de química, medicina,

análisis químicos y desinfección, proporcionando una descripción general de sus propiedades físicas y químicas como resultado de un estudio exhaustivo.

Preparación de muestras de agua activada por plasma: Se utilizó un reactor de flujo continuo del tipo pulsado y se sometió un pequeño volumen de agua a diferentes periodos de tratamiento (ciclos) que fueron de una a cinco repeticiones para su activación y posteriormente poder ser utilizada.

Preparación de cultivos: Se realizó el cultivo de las bacterias con las que se cuenta en el laboratorio (cepas de *Staphylococcus aureus*, *Salmonella typhi* o *Escherichia coli*), llevando a cabo la preparación del medio de cultivo líquido Luria Bertani (LB) que consta de 7.50 gr de NaCl, 3.75 gr de extracto de levadura, 7.50 gr de peptona y 9 gr de agar bacteriológico, ingredientes que fueron mezclados en 750 mL de agua destilada en un matraz Erlenmeyer, posteriormente el matraz se colocó en la autoclave a una temperatura de 120°C durante 25 minutos. Después de obtener el medio de cultivo líquido se tomó una colonia de las bacterias *Staphylococcus aureus* ATCC6538P, *Escherichia coli* ATCC8739 y *Salmonella typhimurium* ATCC14028 inoculándola en 5 mL de medio nutritivo Luria-Bertani (LB) líquido en un tubo para centrifugadora de forma cilíndrica e incubada durante 24 horas a 37°C de tal manera que favoreciera su crecimiento bacteriano.

Posterior a las 24 horas de incubación el cultivo fue centrifugado en dos ocasiones durante 5 minutos a 5000 rpm de tal manera que se propicie una sedimentación de las células bacterianas y sea más fácil retirar el medio nutritivo. Finalmente, al sedimento obtenido se le colocó 5 mL de agua destilada y se agitó en un vortex y se obtuvo las alícuotas para la experimentación, realizando para ello diluciones de la concentración inicial (10^8 o 10^9 UFC/mL) hasta 10^3 UFC/mL para un mayor control de conteo en placa de los resultados.

Experimentación de laboratorio: Se llevó a cabo la experimentación con una concentración inicial de bacterias del orden 10^3 UFC/mL y se aplicó el agua tratada con plasma a diferentes periodos (ciclos) con un tiempo de contacto de 5 minutos durante diferentes tiempos de almacenamiento del agua tratada con la relación 900 μ L de agua tratada con plasma a 100 μ L de células bacterianas.

Pruebas microbiológicas: Después del tiempo de contacto entre las células y el agua tratada (5 minutos) se tomaron alícuotas y se incubaron en cajas Petri en medio LB agar, con el propósito de evaluar el porcentaje de bacterias sobrevivientes al tratamiento mediante la técnica de conteo en placa.

Caracterización del agua y análisis de los resultados: Se analizaron y reportaron los porcentajes de supervivencia bacteriana a partir del análisis de los resultados obtenidos con el programa OriginPro 8.5 en relación porcentaje de supervivencia y tiempo de almacenamiento del agua tratada con plasma a diferentes ciclos. Se determinaron algunas de las especies químicas presentes en el agua a través de prueba de ozono, peróxido de hidrógeno y multiparámetro para caracterización de DO (oxígeno disuelto), pH, temperatura, presión, resistencia, conductividad, TDS (sólidos disueltos totales) y salinidad.

2.2. Material y equipo

2.2.1. Preparación de muestras de agua activada por plasma

En la siguiente figura se presenta el diseño del reactor utilizado para el tratamiento del agua activada por plasma.

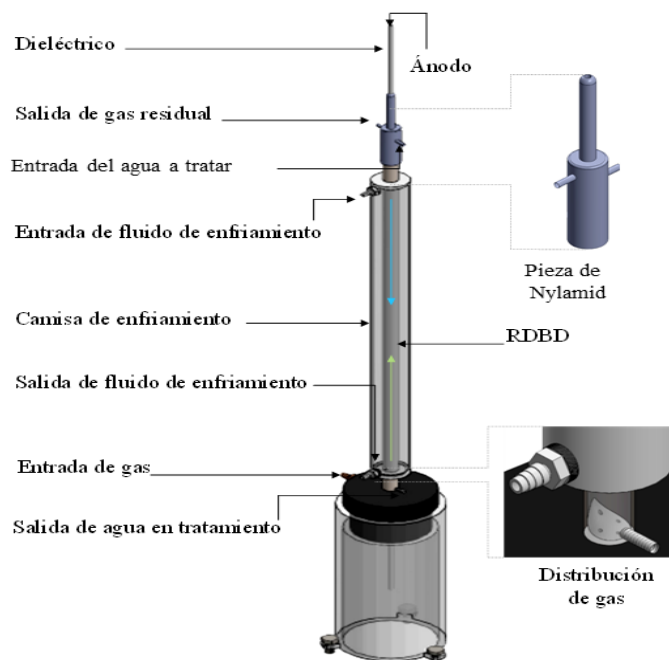


Figura 2. Esquema del reactor de Descargas de Barrera Dieléctrica (DBD).

El agua es circulada por un reactor de flujo continuo del tipo pulsado y se sometió a un potencial de 20 kV con una frecuencia de 500 Hz, se adicionó oxígeno con un flujo de 0.5 LPM. El agua se expuso al plasma durante diferentes periodos de tratamiento (ciclos) equivalentes a 1 mL/0.67 s que fueron de una a cinco repeticiones según la necesidad del experimento.

El agua activada por plasma resultante del reactor fue colocada en un vaso de precipitado de pequeño volumen y cubierta con un trozo de papel aluminio dentro de un refrigerador cuya temperatura fue de 4°C de almacenamiento. Es importante mencionar que el fin de mantener el agua almacenada fue para alargar la vida del producto y evaluar posteriormente su funcionamiento.

Por lo que para esta parte del experimento se hizo uso de: un reactor de plasma DBD, vaso de precipitado de 50 mL, papel aluminio, agua esterilizada y un refrigerador con temperatura de 4°C.

2.2.2. Preparación de cultivos

Se realizó el cultivo de las bacterias con las que se cuenta en el laboratorio (Cepas de *Staphylococcus aureus*, *Salmonella typhi* o *Escherichia coli*), llevando a cabo la preparación del medio de cultivo líquido Luria Bertani (LB) que es uno de los más usados para el cultivo de *Escherichia coli* y otras especies, debido a que es rico en nutrientes, de fácil elaboración y permite un gran crecimiento de variedad de cepas, consta de 7.50 gr de NaCl, 3.75 gr de extracto de levadura, 7.50 gr de peptona y 9 gr de agar bacteriológico, ingredientes que fueron mezclados en 750 mL de agua destilada en un matraz Erlenmeyer para realizar una cantidad de 30 cajas Petri, cantidades que fueron repetidas para obtener un total de 120 cajas por experimento, posteriormente los matraces resultantes de la cantidad necesitada se colocaron en la autoclave a una temperatura de 120°C durante 25 minutos. Se incluyeron 50 mL de medio de cultivo líquido, mezcla que contenía 0.5 gr de NaCl, 0.25 gr de extracto de levadura y 0.5 gr de peptona.

Se realizó el vaciado del medio de cultivo en cajas de Petri y en caso de estas contener burbujas de aire se eliminaron con ayuda del mechero de bunsen, se colocaron en filas de 10 cajas y se dejaron enfriar durante 30 minutos, posteriormente se colocaron las cajas en la incubadora para eliminar restos de gotas de agua.

Después de obtener el medio de cultivo líquido se tomó una colonia de las bacterias con un asa bacteriológica previamente esterilizada de *Staphylococcus aureus* ATCC6538P, *Escherichia coli* ATCC8739 y *Salmonella typhimurium* ATCC14028 inoculándola en 5 mL de medio nutritivo Luria-Bertani (LB) líquido en un tubo para centrifugadora de forma cilíndrica e incubada durante 24 horas a 37°C de tal manera que favoreciera su crecimiento bacteriano.

Posterior a las 24 horas de incubación el cultivo fue centrifugado en dos ocasiones durante 5 minutos a 5000 rpm de tal manera que se propicie una sedimentación de

las células bacterianas y sea más fácil retirar el medio nutritivo, finalmente al sedimento obtenido se le colocó 5 mL de agua destilada y se agitó en un vortex, se obtuvo las alícuotas para la experimentación, realizando para ello diluciones de la concentración inicial (10^8 o 10^9 UFC/mL) hasta 10^3 UFC/mL para un mayor control de conteo en placa de los resultados, en el caso de la bacteria *Escherichia coli* ATCC8739 se realizó una dilución más, dado que se encontraba en una concentración de 10^9 UFC/mL, estas diluciones fueron colocadas en una gradilla y refrigeradas a 4°C.

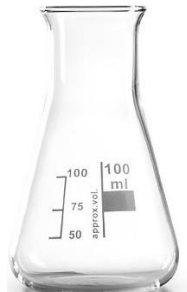
Para la segunda parte del experimento se utilizó:

Tabla 4. Reactivos utilizados para la elaboración de medio de cultivo.

Reactivo	Imagen	Marca
NaCl		J.T. Baker
Agar bacteriológico		BD Bioxon
Extracto de levadura		BD Bioxon
Peptona		BD Bioxon

El material requerido se presenta en la siguiente tabla:

Tabla 5. Material y equipo utilizado para el desarrollo del experimento.

Material y Equipo	Cantidad	Imagen
Matraz Erlenmeyer de 1000 mL	4	
Matraz Erlenmeyer 100 mL	1	
Autoclave	1	
Cajas de Petri	120 (Por experimento)	
Mechero de bunsen	1	

Continuación de Tabla 5. Material y equipo utilizado para el desarrollo del experimento.

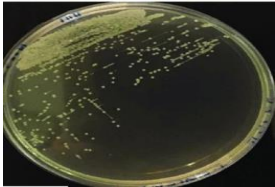
Material y Equipo	Cantidad	Imagen
Campana de flujo laminar	1	
Incubadora	1	
Asa bacteriológica	1	
Tubo para centrifugadora cilíndrico	2	
Centrifugadora	1	
Micropipetas de volumen variable	3	

Continuación de Tabla 5. Material y equipo utilizado para el desarrollo del experimento.

Material y Equipo	Cantidad	Imagen
Puntas para micropipeta	Las necesarias	
Gradilla para tubos de ensayo	1	
Tubos de ensayo	Los necesarios	
Vortex	1	

Las cepas requeridas para incubación se presentan a continuación:

Tabla 6. Cepas utilizadas en el desarrollo del experimento.

Cepa	Clave	Imagen
<i>S. aureus</i>	ATCC6538P	

Continuación de Tabla 6. Cepas utilizadas en el desarrollo del experimento.

Cepa	Clave	Imagen
<i>E. coli</i>	ATCC8739	
<i>S. typhimurium</i>	ATCC14028	

2.2.3. Experimentación de laboratorio

Después de realizar las diluciones correspondientes de las bacterias *Staphylococcus aureus* ATCC6538P, *Escherichia coli* ATCC8739 y *Salmonella typhimurium* ATCC14028 en sus órdenes correspondientes se aplicó el agua tratada con plasma a diferentes periodos (ciclos) a la dilución de 10^3 UFC/mL y en su caso 10^4 UFC/mL para replicar el experimento, con un tiempo de contacto de 5 minutos y refrigeradas a una temperatura de 4°C con la relación 900 μL de agua tratada con plasma a 100 μL de células bacterianas.

2.2.4. Pruebas microbiológicas

Después del tiempo de contacto entre las células y el agua tratada (5 minutos) se tomaron alícuotas y se incubaron en cajas Petri en medio LB agar, con el propósito de evaluar el porcentaje de bacterias sobrevivientes al tratamiento mediante la técnica de conteo en placa.

2.2.5. Caracterización del agua activada por plasma

Para ejecutar la medición de las propiedades del agua previamente tratada se montó el siguiente sistema:



Figura 3. Sistema de caracterización de propiedades fisicoquímicas del agua activada por plasma.

Sistema montado con ayuda de un soporte universal con varilla y pinzas que sostenían el multiparámetro, un vaso de precipitado con el volumen de agua activada por plasma necesaria para cubrir el electrodo, previamente a introducir el electrodo se enjuagó con agua destilada y se encendió la pantalla del equipo esperando la lectura de los parámetros, al terminar la muestra fue refrigerada a 4°C y se esperó la siguiente toma de parámetros, se enjuagó el electrodo y se le colocó en su solución, esperando la siguiente hora y continuamente para la toma de 7 datos. Para la determinación de nitritos, nitratos, peróxido de hidrógeno y ozono se llevaron a cabo tres procedimientos que constaron de la aplicación de tres pruebas con sus respectivos nombres de HANNA® instruments.

Los parámetros medidos en estos experimentos fueron: pH, Conductividad eléctrica, producción de peróxido de hidrógeno, salinidad y TDS.

2.3. Procedimiento para la determinación de ozono

Se usó la pipeta para llenar cada vial de vidrio con 5 mL de muestra, se insertó uno de ellos en la abertura de la herramienta conocida como disco para tener un vial como blanco, al vial libre se le agregó agua desionizada que contiene el HI38054 Ozone Test Kit de HANNA® instruments hasta alcanzar un volumen de 10 mL, se le colocó la tapa y agitó, posteriormente se retiró la tapa y se le agregó un paquete de reactivo HI 937570 que contiene el kit, se tapó y agitó esperando dos minutos a que la reacción se llevará acabo y se colocó en la abertura restante del disco.

Se manipuló el disco frente a una fuente de luz y giró el disco hasta encontrar la coincidencia de color entre la ventana del indicador y la muestra.



Figura 4. Realización del HI38054 Ozone Test Kit de HANNA® instruments.

2.4. Procedimiento para la determinación de peróxido de hidrógeno

En el vaso que contiene el kit HI3844 de HANNA® instruments se llenó con 25 mL de la muestra, en este caso Agua activada por plasma, se añadió 1 mL del reactivo HI 3844-A0 con ayuda de una micropipeta y se mezcló suavemente girando en círculos, Posteriormente se colocó una cucharada del reactivo HI 3844-B0 y se

agitó, Se esperó un tiempo de 15 minutos con el vaso cerrado y en un lugar oscuro (en caso de existir peróxido de hidrógeno este tomará un color amarillo oscuro).

Se añadieron gotas del reactivo de tritación lentamente mientras se giraba lentamente la muestra y se llevó el conteo de las gotas añadidas hasta que el color amarillo desapareció. Se agregaron 2 a 3 gotas del reactivo HI 38344-D0 contenido en el kit y se giró en pequeños círculos hasta que apareció una tonalidad azul, se colocaron nuevamente gotas del reactivo de tritación hasta que el color azul desapareció llevando la cuenta del número total de gotas colocadas.

La concentración del peróxido de hidrógeno (X) se llevó a cabo con la siguiente formula:

$$N. Total de gotas de tritación \cdot 0.25 = X ppm$$



Figura 5. Muestra de agua activada por plasma con una concentración de 1.50 ppm de peróxido de hidrógeno.

2.5. Descripción general de las actividades realizadas en fase química.

Activación del agua química: Se utilizó una adaptación de reactor de tipo *batch* en agitación continua con una lámpara ultravioleta de 110 V, ozono con una salida de 600 mg/h, de 0.5 mL a 1.5 mL de peróxido de hidrógeno en 200 mL de agua y 20 ppm de colorante Naranja (II) a tratar durante 1 hora.

Los 200 mL de agua pura fueron colocados en un vaso de precipitado de bajo volumen, sobre una placa de agitación magnética, suministrándole a través de una jeringa la cantidad de peróxido de hidrógeno deseada y por medio de una manguera un flujo de 600 mg/h de ozono en agua, haciendo girar los reactivos durante una hora continua para su activación y posteriormente se colocó el contaminante.

Experimentación de laboratorio: Se llevó a cabo la experimentación con una concentración de 20 ppm de colorante Naranja (II) y se aplicó al agua previamente activada durante una hora en continua agitación para un caso, posteriormente se aplicó la misma concentración de colorante en agua y se agregaron los reactivos correspondientes para su activación *in situ*.

Pruebas fisicoquímicas: Al principio de la activación del agua se tomaron muestras de color, pH, concentración de peróxido de hidrógeno, posteriormente se tomaron los mismos parámetros cada diez minutos durante un lapso de una hora con el propósito de evaluar el rendimiento del tratamiento de agua activada químicamente para la eliminación de contaminantes químicos.

2.6. Material y equipo

2.6.1. Preparación de muestras de agua activada a través de agentes oxidantes

La función principal de un reactor de tipo *batch* es asegurar el contacto entre los sustancias que participaran en una reacción química, produciendo otra u otras distintas a las originales, el agua es almacenada en el tanque (vaso de precipitado de bajo volumen) adicionando una lámpara de luz ultravioleta, suministrando gas ozono con un flujo de 600 mg/h a través de una manguera y una cantidad de peróxido de hidrógeno de 0.5 mL aplicada con una jeringa, sometido a constante agitación en una placa de agitación magnética.

Para el primer experimento, estos reactantes en agua se dejaron en activación durante una hora sin parar y posteriormente se le agregó la concentración de color,

sin suministrar más gas ozono, sin luz y sin más peróxido de hidrógeno, las muestras fueron tomadas cada 10 minutos, durante una hora.

Para el segundo experimento, los reactantes en conjunto fueron agregados desde el principio y se dejaron actuar durante una hora constante, las muestras fueron tomadas en lapsos de 10 minutos durante una hora.

Para la fase química de este experimento se hizo uso de material como el siguiente:

Tabla 7. Reactivos utilizados para el experimento en fase química.

Reactivo	Imagen	Marca
Peróxido de hidrógeno		Fermont
Colorante Naranja (II)		HYCEL

Tabla 8. Material y equipo utilizado para el experimento en fase química.

Material y Equipo	Cantidad	Imagen
Vaso de precipitado de 200 mL	1	
Placa de agitación magnética	1	
Mosca agitadores magnéticos	1	
Generador de ozono	1	
Tiras reactivas de peróxido de hidrógeno	Las necesarias	
Kit de dióxido de carbono	1	

Continuación Tabla 8. Material y equipo utilizado para el experimento en fase química.

Material y Equipo	Cantidad	Imagen
Celdas de cuarzo	4	
Espectrofotómetro	1	
Lámpara ultravioleta	1	
Medidor de pH	1	
Medidor de color UPC	1	

2.6.2. Experimentación de laboratorio

Agua activada previamente: Para el primer método se ocupó un volumen de 200 mL de agua en un vaso de precipitado, se le suministró gas ozono a través de un generador de 600 mg/h, 0.5 mL de peróxido de hidrógeno, una lámpara ultravioleta de 110 V y se dejó en acción durante una hora continua, posterior a la hora se apagó el generador de ozono y la lámpara ultravioleta, el vaso se colocó sobre una placa de agitación magnética y en su interior se depositó un agitador, se colocó el contaminante, es decir, 20 ppm de colorante Naranja (II), y se puso en agitación durante una hora más, las muestras fueron tomadas cada 10 minutos.

Agua activada y contaminante: Para el segundo método se colocó en un vaso de precipitado 200 mL de agua, se colocó sobre la placa de agitación magnética con una mosca de agitación en su interior, se comenzó a agitar y se suministró gas ozono a través de un generador de 600 mg/h y a su vez un pequeño volumen de 1 mL peróxido de hidrógeno, se activó la lámpara ultravioleta de 110 V y se depositó el contaminante Naranja (II) con una concentración de 20 ppm, en el agua, se dejó en agitación durante una hora y posteriormente a la hora de inicio se tomaron muestras cada 10 minutos. Este método fue repetido agregando 1.5 mL de peróxido de hidrógeno.

2.6.3. Pruebas fisicoquímicas

Después de la activación del agua sin y con el contaminante Naranja (II) a una concentración de 20 ppm se tomaron datos de pH, color en Unidades Platino Cobalto (UPC), concentración de peróxido de hidrógeno y concentración de dióxido de carbono con el propósito de evaluar las características adoptadas por el agua y el rendimiento del tratamiento ante contaminantes no biológicos, así mismo el rendimiento de degradación del contaminante en el medio a través de espectrofotometría.

2.6.4 Caracterización del agua activada químicamente

Para realizar la toma de parámetros del agua activada antes y durante, se montó el siguiente sistema:

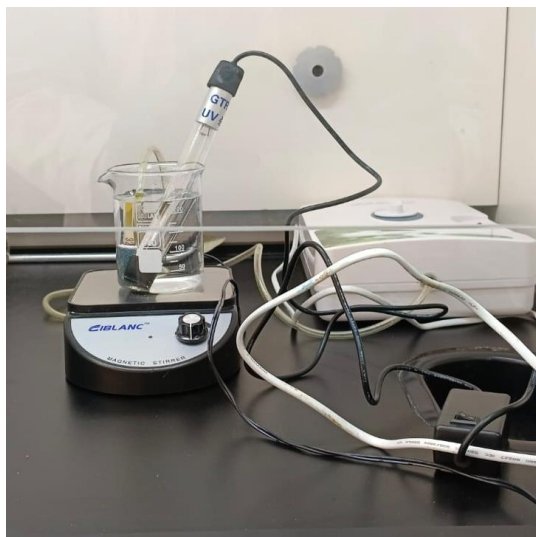


Figura 6. Sistema de tratamiento y toma de propiedades fisicoquímicas del agua activada químicamente.

El sistema montado consiste de una placa de agitación magnética para mantener la muestra en agitación continua, un vaso de precipitado con el volumen de agua activada o volumen de agua por activar, la necesaria para que la lámpara de luz ultravioleta este en contacto con el agua y el gas ozono distribuido por el generador a su costado derecho, se introdujo un medidor de pH encendido para tomar lectura cada 10 min y con las tiras reactivas de peróxido de hidrógeno se tomó la concentración de este en el agua cada cierto tiempo. Con el colorímetro digital se realizó la prueba de color tomando una muestra de 10 mL de la muestra total y se tomaron las UPC, posterior a la prueba se tomaron muestras en celdas de cuarzo para su lectura en el espectrofotómetro, todas las muestras fueron recuperadas en el volumen inicial de la muestra a tratar.

2.6.5. Procedimiento para la determinación de dióxido de carbono

En cuerpos de agua naturales la presencia de dióxido de carbono es normal, sin embargo, las aguas usualmente contaminadas tienden a generar cantidades mayores de este gas ante la descomposición de materia orgánica o mineral, lo que provoca propiedades corrosivas y tóxicas para el medio acuático. El procedimiento de determinación de dióxido de carbono con el kit HI 3818 de HANNA® instruments fue de fácil manejo, ya que está diseñado para su uso dentro del laboratorio.

Se tomó el vaso graduado del kit con un volumen de 5 mL de agua de la muestra, se colocó la tapa y añadió una gota del indicador de fenolftaleína a través del orificio de la tapa del vaso graduado, se mezcló girando en círculos, con ayuda de la jeringa que contiene el kit, se introdujo completamente en el reactivo 2 hasta obtener el volumen deseado, la punta se introdujo en el orificio del vaso de plástico y se añadió gota a gota la solución, girando para mezclar los reactivos, la solución se añadió hasta que la mezcla del vaso se tornara rosa, los mililitros gastados de la solución se leyeron y se realizó el cálculo con la fórmula establecida en el kit.

$$\text{Mililitros de solución gastada} \times 100 = \frac{mg}{L} \text{ o ppm de } CO_2$$

Capítulo 3.

Resultados y

discusión

3.1. Tratamiento de *Staphylococcus aureus*

La figura 7, muestra los resultados de supervivencia de la bacteria *Staphylococcus aureus* a una concentración inicial de aproximadamente 1×10^3 UFC/mL después del contacto con agua activada por plasma a un ciclo. Se observa una caída del porcentaje de supervivencia de la bacteria al tratarla inmediatamente después de la salida del agua del reactor de plasma y posteriormente cada hora que permaneció almacenada.

En esta figura y posteriores, C se refiere al número de ciclos (En este caso C1 corresponde a un ciclo) de tratamiento a la que es sometida el agua al plasma, y T es el tiempo de almacenamiento del agua (T0 es el tiempo inicial de almacenamiento o 0 h), a condiciones de temperatura previamente descritas. Es importante mencionar que el tiempo T0 considera el tiempo en que se traslada la muestra del reactor al lugar de sembrado (transcurridos 5 min aproximadamente) y T1 en adelante considera la hora posterior a la que sale del reactor de plasma.

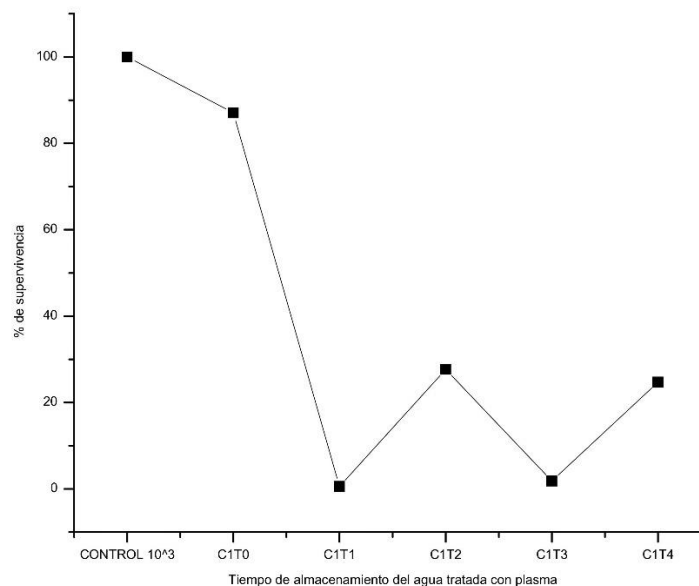


Figura 7. Supervivencia de la bacteria *Staphylococcus aureus* a una concentración inicial de 10^3 UFC/mL con agua activada por plasma a un ciclo.

La figura 8 muestra los resultados de supervivencia de la bacteria *Staphylococcus aureus* después del contacto con el agua activada por plasma a dos ciclos. En la figura se observa que el porcentaje de bacterias inicial disminuye notoriamente ante el tratamiento, conservando sus propiedades de desactivación durante 4 horas posteriores a su salida del tratamiento.

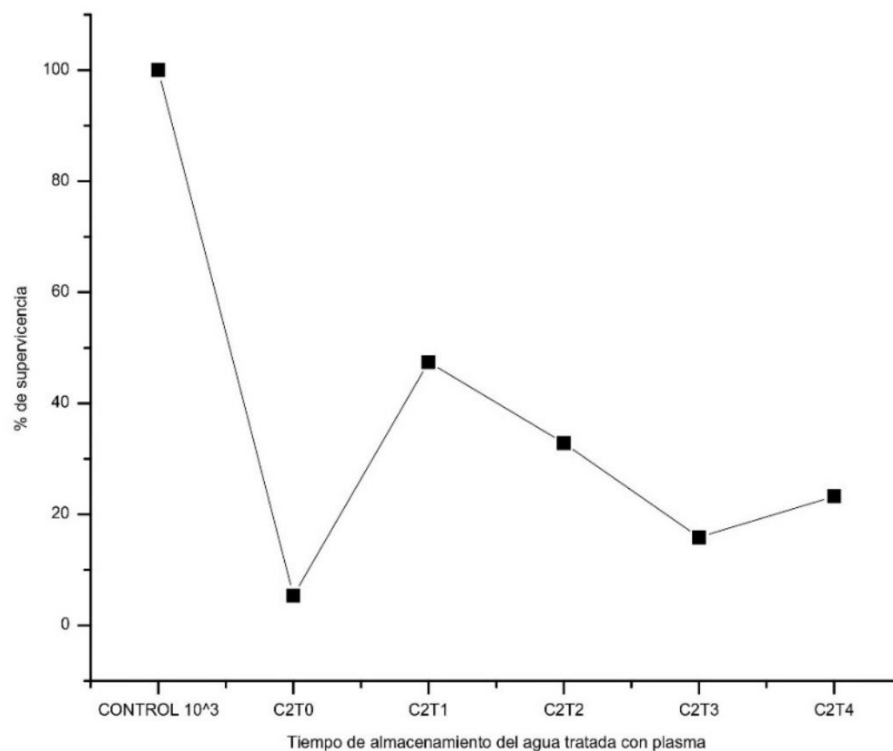


Figura 8. Supervivencia de la bacteria *Staphylococcus aureus* a una concentración inicial de 10^3 UFC/mL con agua activada por plasma a dos ciclos.

La figura 9 muestra los resultados de supervivencia de la bacteria *Staphylococcus aureus* con el tratamiento de un agua sometida a tres ciclos. El efecto de desactivación se mantiene después de 4 horas de almacenamiento, obteniendo un porcentaje de supervivencia mínimo de 4% a las 3 horas.

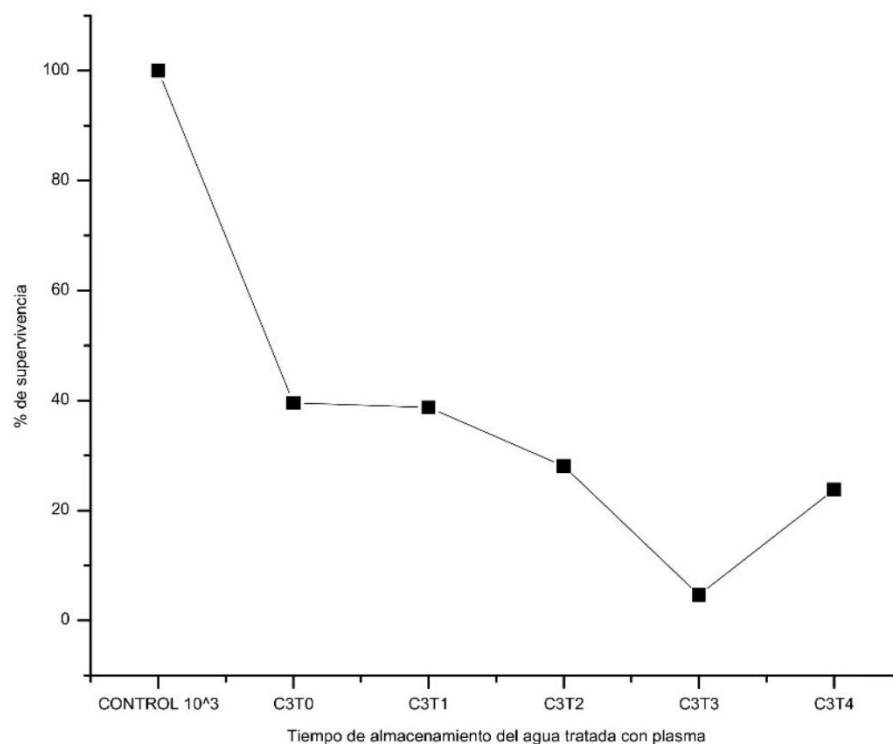


Figura 9. Supervivencia de la bacteria *Staphylococcus aureus* a una concentración inicial de 10^3 UFC/mL con agua activada por plasma a tres ciclos.

La figura 10 muestra los resultados de supervivencia de la bacteria *Staphylococcus aureus* a una concentración inicial de aproximadamente 1×10^3 UFC/mL después del contacto con agua activada por plasma a cuatro ciclos, donde se observa una evidente caída del porcentaje de supervivencia. Los porcentajes de supervivencia de la bacteria son cercanos al 0%.

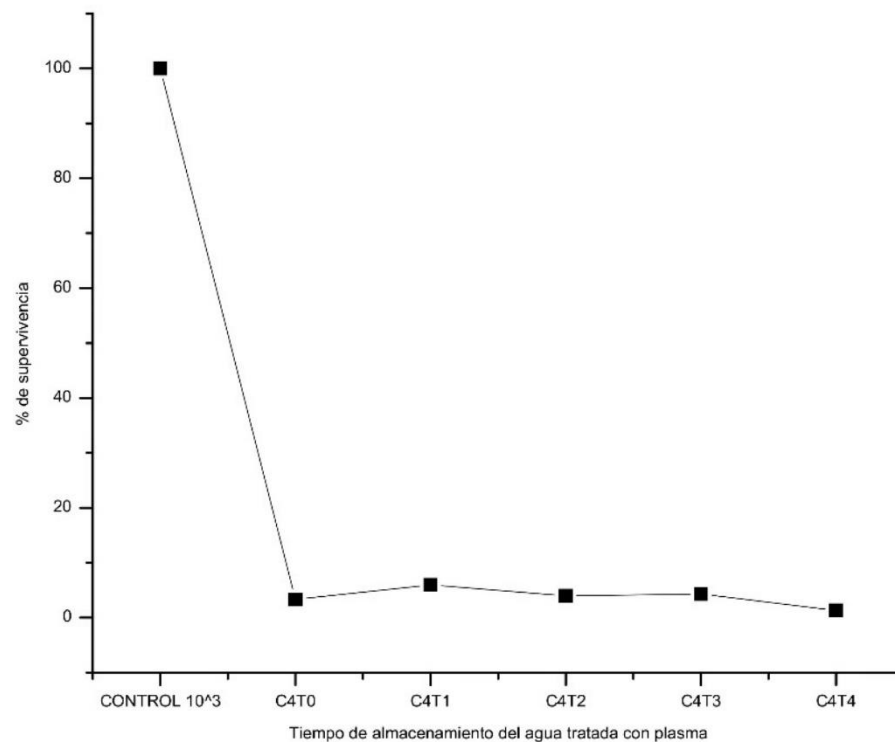


Figura 10. Supervivencia de la bacteria *Staphylococcus aureus* a una concentración inicial de 10^3 UFC/mL con agua activada por plasma a cuatro ciclos.

La figura 11 muestra los resultados de supervivencia de la bacteria *Staphylococcus aureus* con el agua obtenida después de cinco ciclos de tratamiento, obteniendo una supervivencia mínima del 2% en las horas 3 y 4.

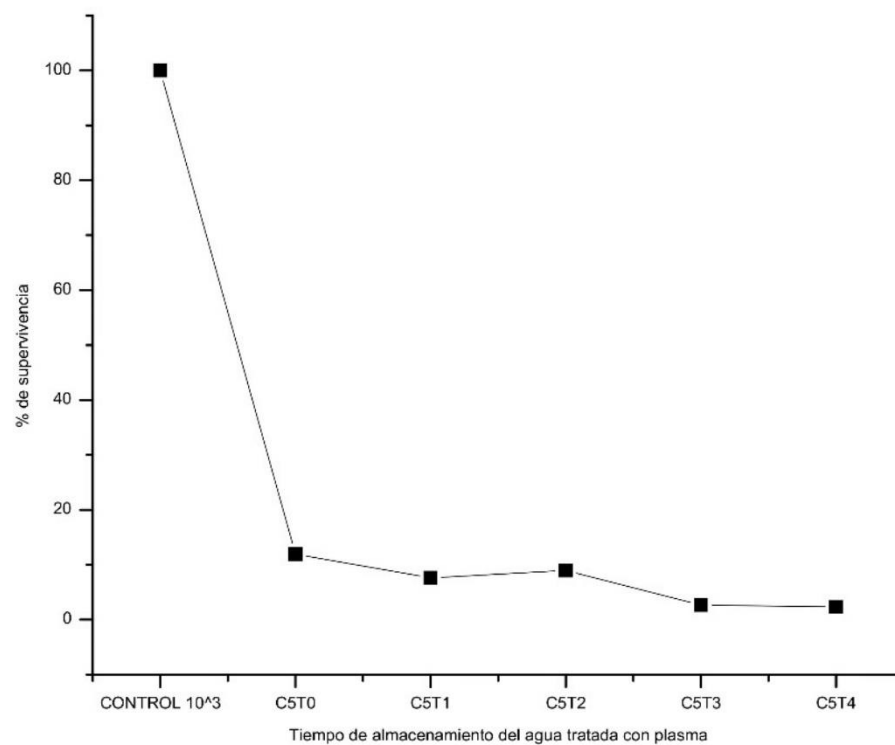


Figura 11. Supervivencia de la bacteria *Staphylococcus aureus* a una concentración inicial de 10^3 UFC/mL con agua activada por plasma a cinco ciclos.

La figura 12 muestra los resultados de supervivencia de la bacteria *Staphylococcus aureus* a una concentración inicial de aproximadamente 1×10^4 UFC/mL después de un tratamiento con agua activada por plasma a cuatro ciclos durante cuatro horas de almacenamiento, en la que se observan porcentajes de supervivencia de la bacteria próximos al 0% en T0 y T1, posteriormente los porcentajes de supervivencia en las próximas horas restantes permanece entre un 39% y 33%.

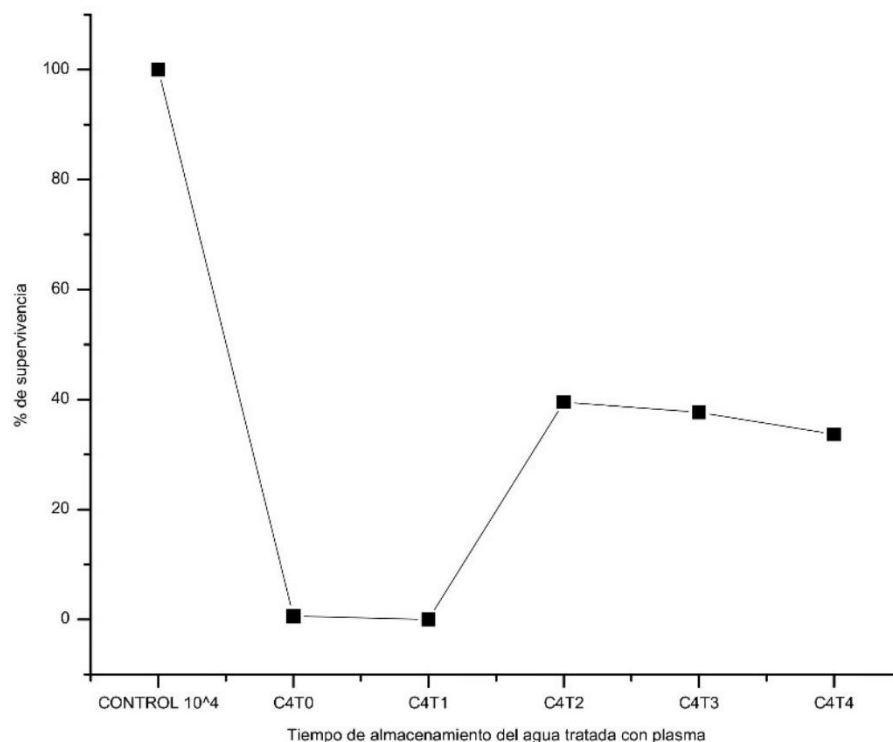


Figura 12. Supervivencia de la bacteria *Staphylococcus aureus* a una concentración inicial de 10^4 UFC/mL con agua activada por plasma a cuatro ciclos.

La figura 13 muestra los resultados de supervivencia de la bacteria *Staphylococcus aureus* con el tratamiento de agua activada por plasma a cinco ciclos, obteniendo un resultado favorable de desactivación durante las primeras tres horas con valores cercanos a 0% y en las horas subsiguientes un aumento que va del 30% al 16%.

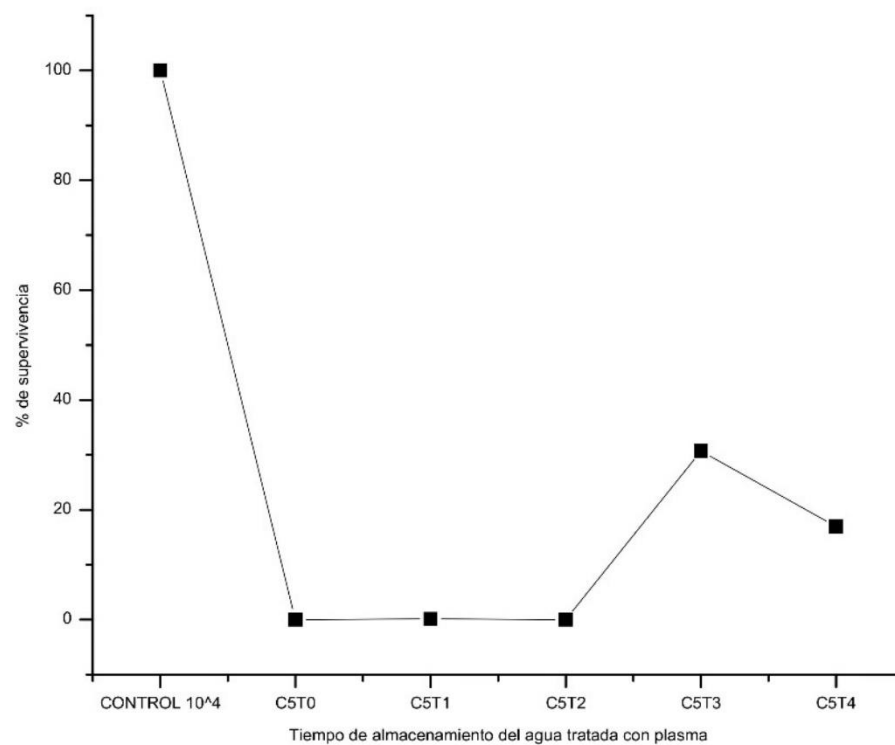


Figura 13. Supervivencia de la bacteria *Staphylococcus aureus* a una concentración inicial de 10^4 UFC/mL con agua activada por plasma a cinco ciclos.

3.2. Tratamiento de *Escherichia coli*

La figura 14 muestra los resultados del tratamiento de la bacteria *Escherichia coli* a una concentración inicial de 1×10^4 UFC/mL con agua activada por plasma durante 3 ciclos. El porcentaje de supervivencia es mínimo durante las primeras horas y posterior a ellas se encuentra un aumento a un máximo 70%.

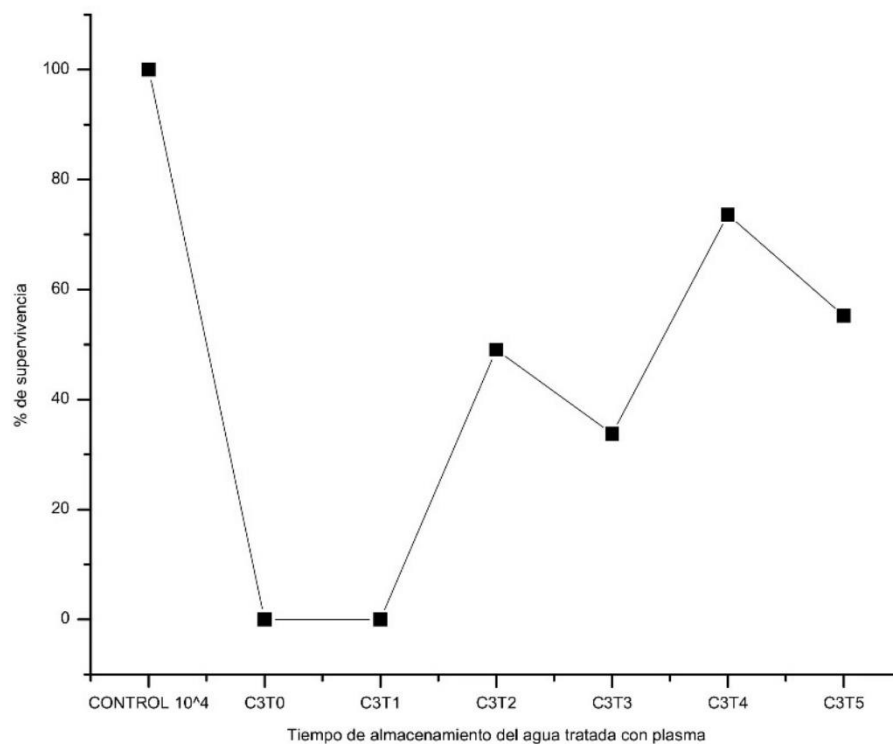


Figura 14. Supervivencia de la bacteria *Escherichia coli* a una concentración de 10^4 UFC/mL con agua activada por plasma a tres ciclos.

La figura 15, muestra los resultados de supervivencia de la bacteria *Escherichia coli* con el tratamiento de agua activada por plasma de cuatro ciclos, obteniendo datos de eficiencia del tratamiento satisfactorios puesto que su supervivencia fue próxima a un 0% desde el T0 a T5, es decir, después de 5 h de almacenamiento el agua mantuvo su efecto bactericida.

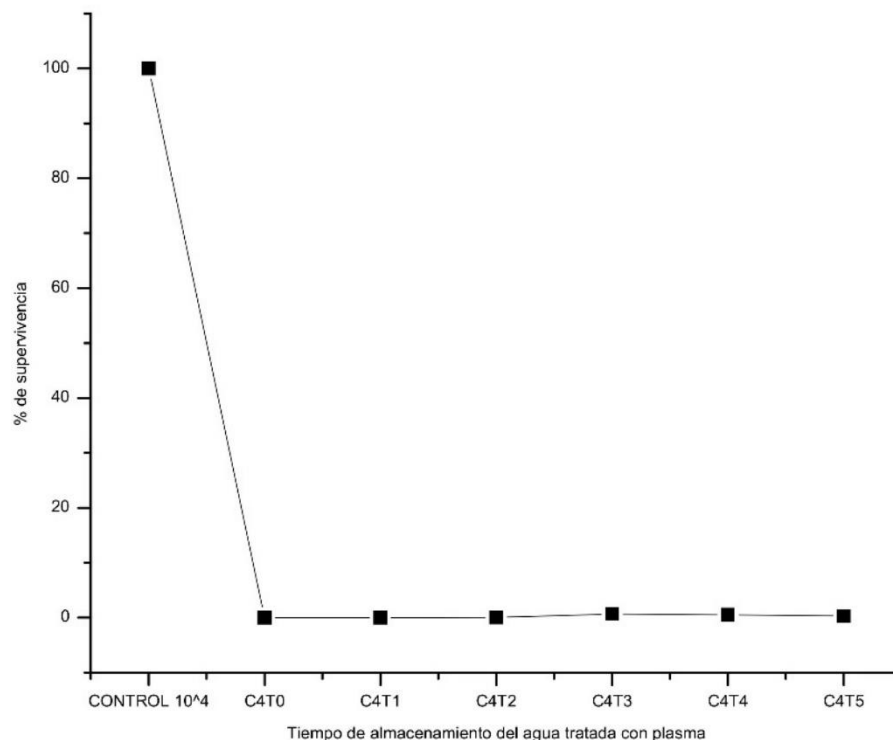


Figura 15. Supervivencia de la bacteria *Escherichia coli* a una concentración de 10^4 UFC/ mL con agua activada por plasma a cuatro ciclos.

3.3. Tratamiento de *Salmonella typhimurium*

La figura 16, muestra los resultados de supervivencia de la bacteria *Salmonella typhimurium* después del tratamiento de agua activada por plasma durante cuatro ciclos en la que se observa una disminución notoria de la concentración de la bacteria a lo largo de cinco horas, obteniendo un porcentaje mínimo de 0% en T0 y uno máximo del 70% de supervivencia a T5.

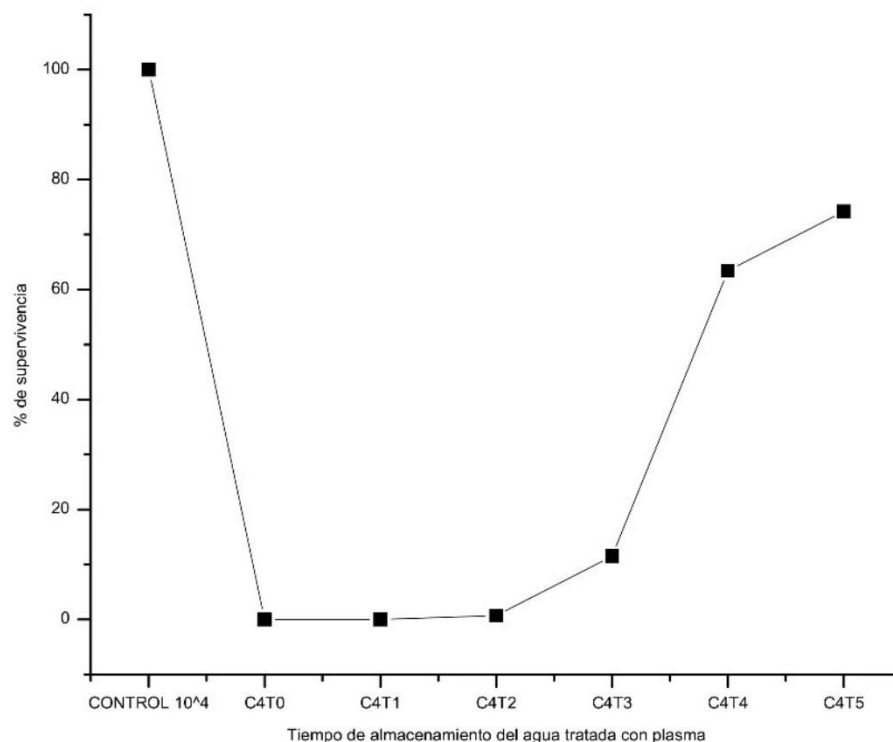


Figura 16. Supervivencia de la bacteria *Salmonella typhimurium* a una concentración de 10^4 UFC/mL con agua activada por plasma a cuatro ciclos.

La figura 17, muestra los resultados de supervivencia a cinco ciclos, en la que se observa la efectividad del tratamiento al obtener una supervivencia próxima a 0% durante las primeras tres horas; posteriormente la supervivencia aumenta a un máximo de 57%.

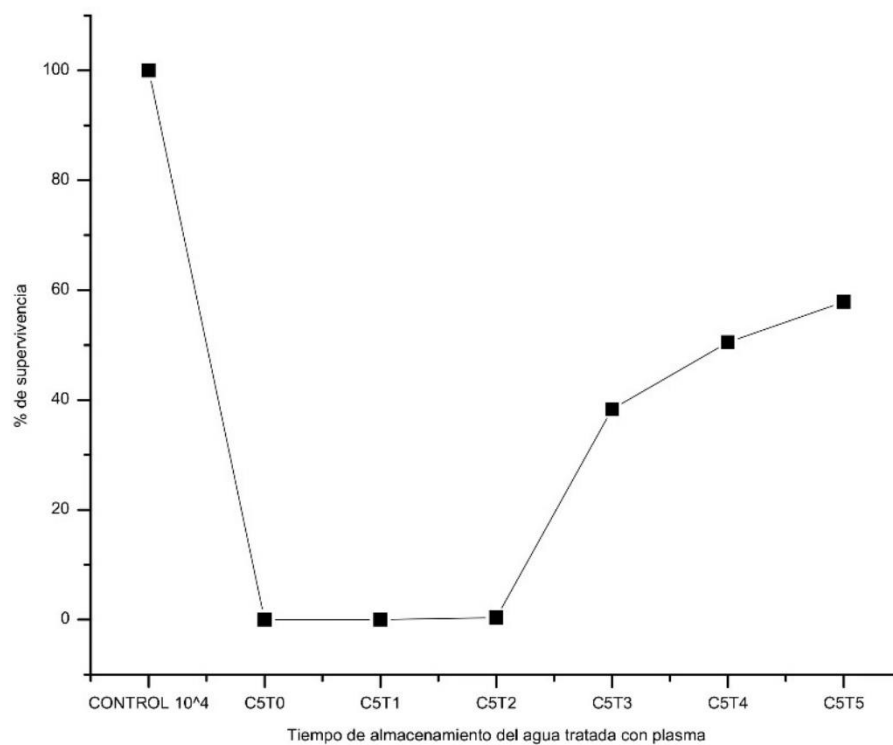


Figura 17. Supervivencia de la bacteria *Salmonella typhimurium* a una concentración de 10^4 UFC/mL con agua activada por plasma a cinco ciclos.

3.4. Caracterización del agua activada por plasma frío

La tabla 9, muestra los datos obtenidos de un muestreo de agua destilada y del agua activada por plasma a 5 ciclos.

Tabla 9. Parámetros evaluados de una muestra de agua activada por plasma.

	Agua destilada T0	Agua activada por plasma 5 ciclos en T0
Parámetro	Media $\pm$ DS	Media $\pm$ DS
DO (PPM)	4.3614 $\pm$ 0.0038	7.5986 $\pm$ 0.0452
pH	7.8271 $\pm$ 0.0652	5.9457 $\pm$ 0.1141
Temperatura (°C)	14.68 $\pm$ 0	16.2757 $\pm$ 0.0257
Presión (kPa)	70.92 $\pm$ 0	71.1357 $\pm$ 0.0139
Resistividad (M Ω ·cm)	0 $\pm$ 0	0 $\pm$ 0
Conductividad (μ S/cm)	0 $\pm$ 0	0 $\pm$ 0
TDS (PPM)	0 $\pm$ 0	0 $\pm$ 0
Salinidad	0 $\pm$ 0	0 $\pm$ 0
ORP	-35.8714 $\pm$ 0.2984	51.7143 $\pm$ 9.0385
DO (%)	61.8428 $\pm$ 0.0534	111.1857 $\pm$ 0.6466

El ozono en el agua presenta características desinfectantes de bacterias, virus y parásitos, por lo tanto, para esta prueba es ideal que la muestra no contenga esta propiedad, dado que se pretende mostrar como el agua después de ser activada por plasma adopta propiedades microbicidas. La figura 18, muestra los resultados de una prueba HI38054 Ozone Test Kit de HANNA® instruments de una muestra de agua destilada en T0, obteniendo como resultado un valor de 0 ppm de ozono presente en una muestra de 5 mL.

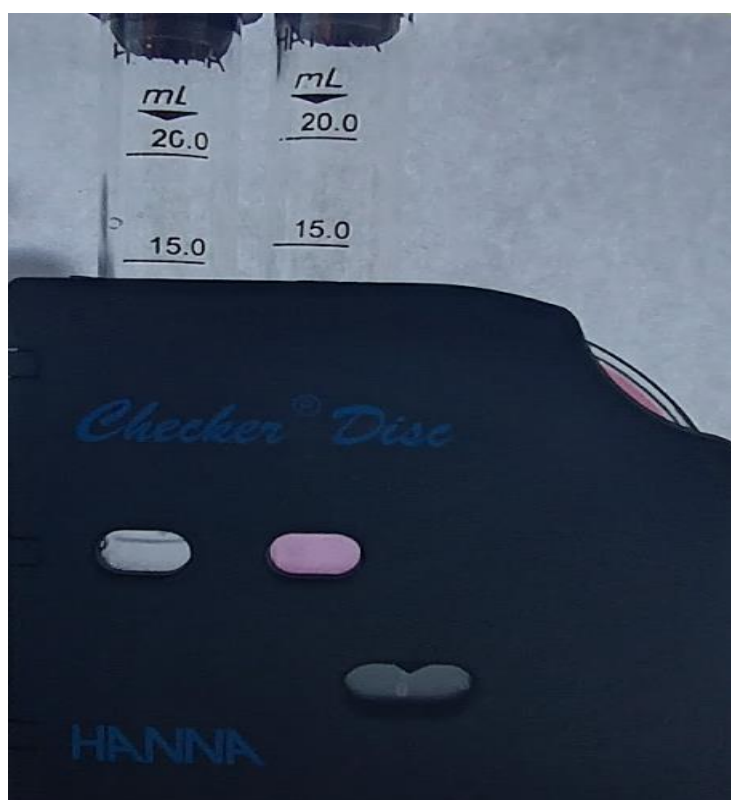


Figura 18. Prueba de ozono en una muestra de agua destilada en T0.

Sin embargo, al realizar la misma prueba en una muestra de agua previamente activada por plasma a cinco ciclos en T0, esta presentó un resultado de 0.9 ppm de ozono presente en el agua, mostrado en la figura 19, mientras que en el T5 presentó un resultado de 2.0 ppm de ozono presente en el agua mostrado en la figura 20.



Figura 19. Prueba de ozono en una muestra de agua activada por plasma a cinco ciclos en T0.



Figura 20. Prueba de ozono en una muestra de agua activada por plasma a cinco ciclos en T5.

El peróxido de hidrógeno es utilizado como un fuerte oxidante en procesos de oxidación química en suelos y aguas contaminadas, tras la producción de radicales hidroxilos (OH) que tienen la capacidad de depurar contaminantes presentes en el medio. Se realizó una prueba del kit HI3844 de HANNA® instruments para determinar la concentración del peróxido de hidrógeno en una muestra de agua destilada, una muestra de agua activada por plasma y una muestra de agua activada por plasma posterior a 5 horas.

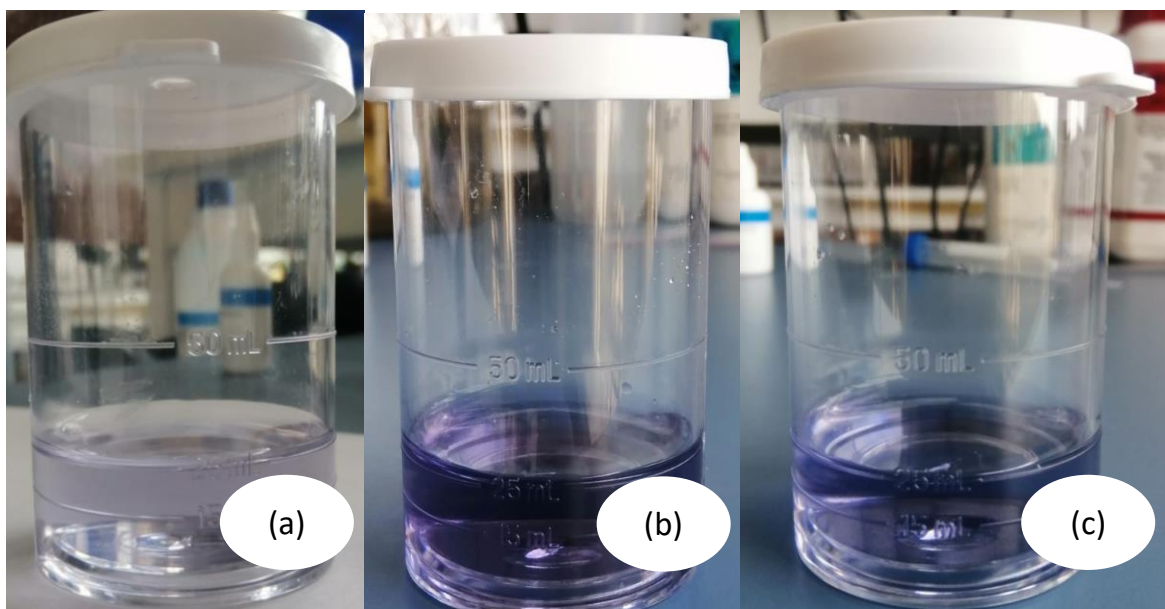


Figura 21. Prueba de peróxido de hidrógeno en una muestra de agua destilada en T0 (a), muestra de agua activada por plasma a cinco ciclos T0 (b) y muestra de agua activada por plasma a cinco ciclos en T5 (c).

Para la determinación de los valores correspondientes se realizó los siguientes cálculos con ayuda de la siguiente formula:

$$N.Total\ de\ gotas\ de\ tritación \cdot 0.25 = Xppm$$

- a) $6gotas \cdot 0.25 = 1.50ppm\ H_2O_2$
- b) $10gotas \cdot 0.25 = 2.5ppm\ H_2O_2$
- c) $7gotas \cdot 0.25 = 2.0ppm\ H_2O_2$

3.5. Obtención de resultados para tratamiento de Naranja (II)

Para la identificación de las muestras se llevó a cabo a través del uso de espectrofotometría UV-visible, identificando la longitud máxima de emisión del contaminante en cuestión. Se realizó un espectro de absorción ultravioleta en una concentración inicial de 20 ppm obteniendo una longitud de onda de 466 nm en cubetas de cuarzo con una absorbancia de 2.4217.

La ecuación utilizada para la determinación de resultados fue la siguiente:

$$\frac{A1}{C1} = \frac{A2}{C2}$$

Donde A corresponde a la absorbancia y C a la concentración del contaminante en ppm, partiendo de la ecuación anterior y despejando para el cálculo de la concentración a conocer se obtiene:

$$Concentración_2 = \frac{C1 * A2}{A1}$$

Seguida de la ecuación obtenida para determinar el % de eficiencia del tratamiento, donde A1 define a absorbancia inicial y A2 define a absorbancia final.

$$\% \text{ eficiencia} = \left(\frac{A2 * 100\%}{A1} \right)$$

3.6. Tratamiento de Naranja (II) con agua activada a través de agentes oxidantes

La figura 22 presenta los resultados en porcentaje de eficiencia de un tratamiento de 200 mL de agua activada durante una hora con 0.5 mL de H_2O_2 , ozono y luz ultravioleta a 110 V. Es importante mencionar que la activación y el contacto del contaminante con el agua activada se refieren a dos intervalos de tiempo distintos. La primera hora corresponde a la activación del agua, mientras que la segunda al contacto del contaminante con la muestra de agua activada. Se aplicó una concentración inicial de 20 ppm de Naranja (II), se observó un crecimiento lento y poco eficiente a través del tiempo, durante los primeros 10 minutos de contacto se obtuvo un porcentaje de eficiencia del 5.57% y a los 60 minutos se llegó a cubrir un 12.18% de eficiencia en el primer experimento.

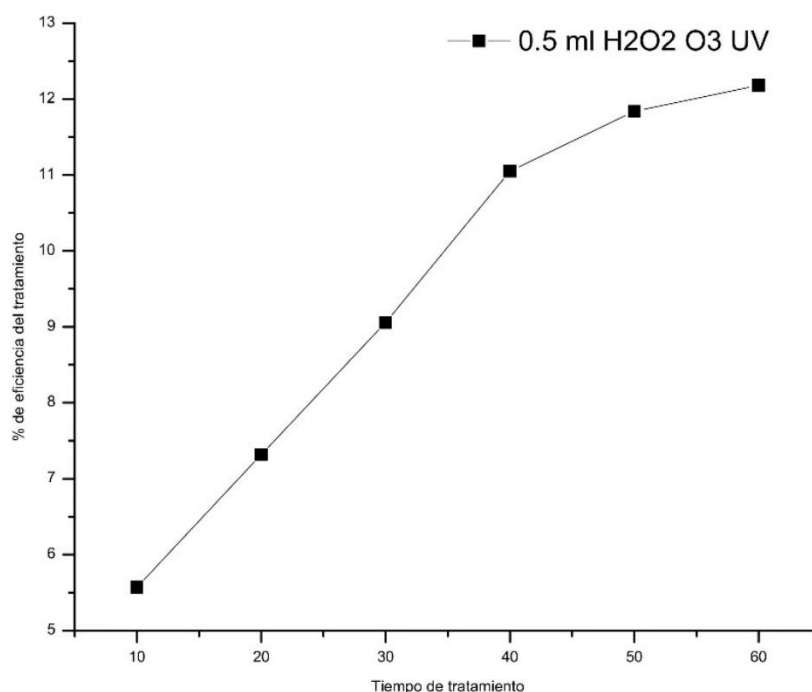


Figura 22. Porcentaje de eficiencia del tratamiento de agua activada con 0.5 mL de H_2O_2 , aplicación de ozono y UV durante una hora con una concentración de 20 ppm de Naranja (II).

La figura 23 muestra los porcentajes de eficiencia de un tratamiento con diferentes condiciones de activación, con el mismo volumen, pero únicamente aplicando ozono durante una hora con un flujo de 600 mg/h y posteriormente el contaminante entró en contacto con el agua previamente tratada. Se observa un porcentaje de eficiencia del 14.43%, posteriormente a los 20 minutos se encuentra con un porcentaje del 16.14 el punto máximo de eficiencia de este experimento y a continuación las siguientes tomas de muestra disminuye del 15.56 % al 11.49%.

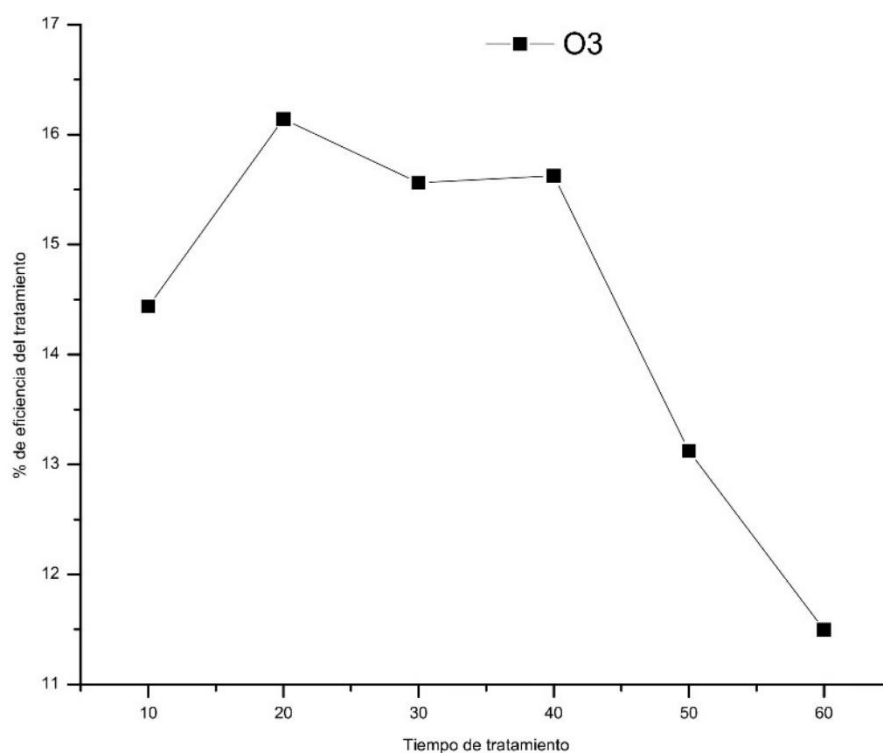


Figura 23. Porcentaje de eficiencia del tratamiento de agua activada con aplicación de ozono durante una hora con una concentración de 20 ppm de Naranja (II).

En la figura 24 se observan los resultados expresados en porcentaje de eficiencia de un tratamiento de activación de agua a través de una hora de aplicación de ozono a 600 mg/h, luz ultravioleta a 110 V y 1 mL de peróxido de hidrógeno al entrar en contacto un contaminante a una concentración de 20 ppm de Naranja (II) después de la hora de activación del agua. Se muestra un 8.77% de eficiencia en los primeros diez minutos de contacto, posteriormente la segunda muestra se desplaza a una eficiencia del 10.37% a los 20 minutos de estar el contaminante en contacto con el agua previamente activada, para los tiempos posteriores se obtiene una eficiencia que oscila entre los 10.19% y 10.14%.

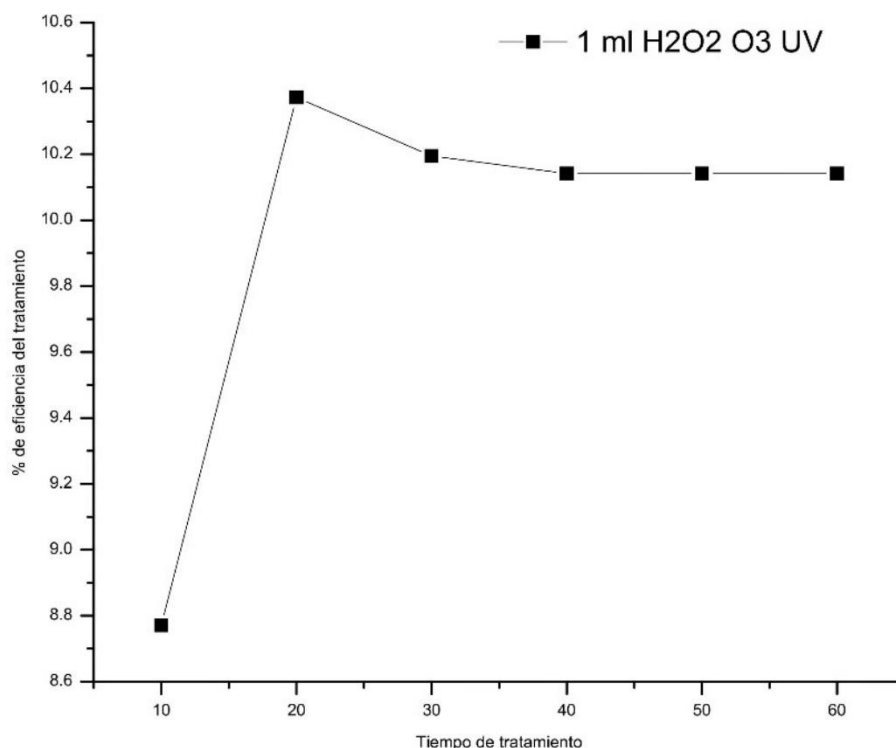


Figura 24. Porcentaje de eficiencia del tratamiento de agua activada químicamente con 1 mL de H_2O_2 , aplicación de ozono y UV durante una hora con una concentración de 20 ppm de Naranja (II).

La figura 25 muestra los resultados obtenidos de un tratamiento de agua activada químicamente con 1.5 mL de peróxido de hidrógeno, aplicación de ozono y luz ultravioleta durante una hora. Posteriormente, al entrar en contacto un contaminante con una concentración de 20 ppm de Naranja (II), se observa que a los 10 minutos de entrar en contacto con el agua su porcentaje de eficiencia tiende a ser de 0.43%, a los 20 minutos se obtiene un 4.89%, a los 30 minutos se obtiene un 6.60% de eficiencia, 10 minutos después se obtiene un porcentaje de eficiencia del 8.08%, a los 50 minutos tiende a incrementar a un 10.54% de eficiencia, y a la hora cierra con un 12.04% de eficiencia, llegando a porcentajes similares a los experimentos anteriores.

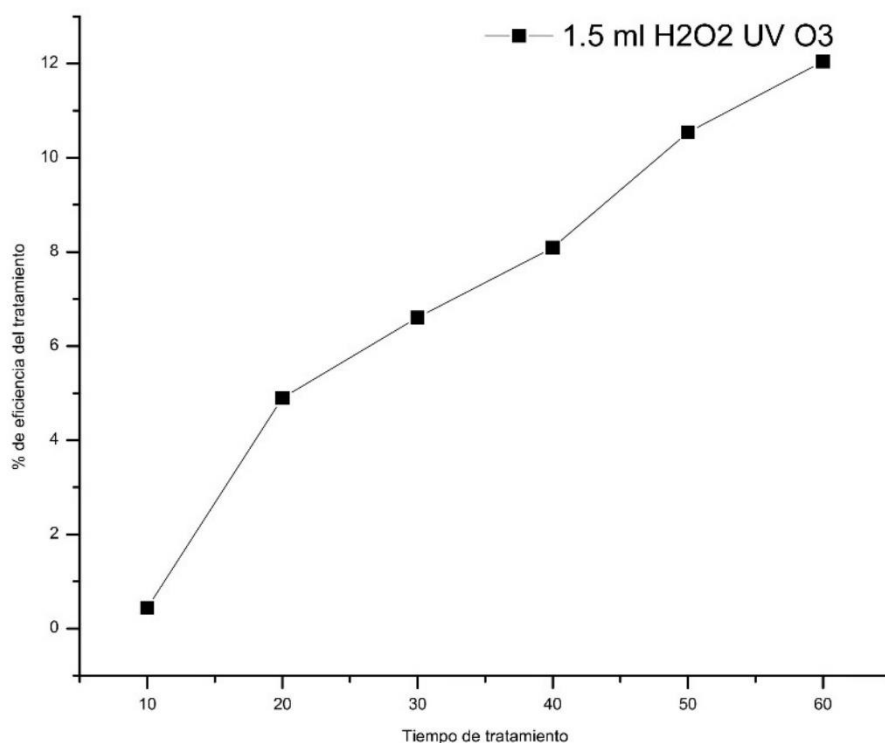


Figura 25. Porcentaje de eficiencia del tratamiento de agua activada químicamente con 1.5 mL de H_2O_2 , aplicación de ozono y UV durante una hora con una concentración de 20 ppm de Naranja (II).

En la figura 26 se muestran los resultados obtenidos de un tratamiento en el que el agua se activó al mismo tiempo que se depositó el contaminante, es decir, un tratamiento *in situ*, aplicando en conjunto 20 ppm de Naranja de (II), 1.5 mL de peróxido de hidrógeno, luz ultravioleta y ozono con un flujo de 600 mg/h, durante una hora. Al actuar el tratamiento durante los primeros 10 minutos, se obtuvo un 87.65% de eficiencia, a los 20 minutos se observa un crecimiento en el porcentaje obteniendo un 98.64% de eficiencia, a los 30 minutos de tratamiento se observa un 99.51% de eficiencia, a los 40 minutos el porcentaje incrementa a 99.57% de eficiencia y para los 50 y 60 minutos de tratamiento se obtiene un porcentaje de eficiencia del 99.97%, obteniendo resultados favorables en el tratamiento del contaminante por este método.

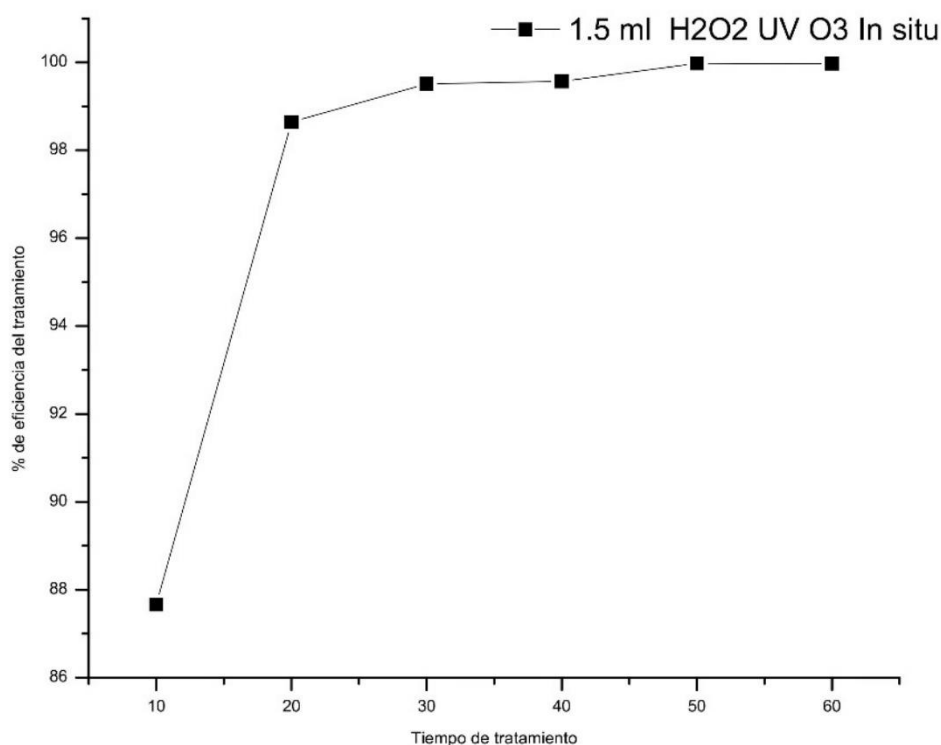


Figura 26. Porcentaje de eficiencia del tratamiento de agua activada químicamente con 1.5 mL de H_2O_2 , aplicación de ozono y UV durante una hora con una concentración de 20 ppm de Naranja (II) (In situ).

La figura 27 muestra los resultados de un experimento bajo las siguientes condiciones, 200 mL de agua activada con 1 mL de peróxido de hidrógeno, aplicación de ozono con un flujo de 600 mg/h, luz ultravioleta de 110 V y 20 ppm de Naranja (II) en continua agitación durante 60 minutos. Durante los primeros 10 minutos de tratamiento se obtiene un porcentaje de eficiencia del 79.17%, a los 20 minutos de tratamiento se obtiene un porcentaje del 97.39%, para los tiempos restantes su porcentaje de eficiencia llega a un máximo de 99.73%.

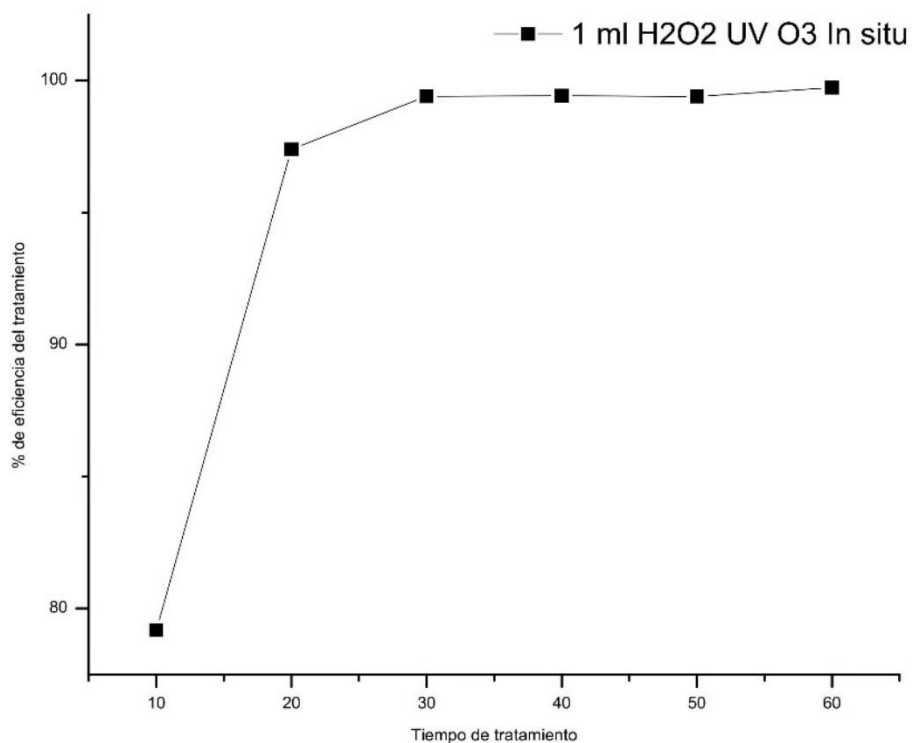


Figura 27. Porcentaje de eficiencia del tratamiento de agua activada químicamente con 1 mL de H_2O_2 , aplicación de ozono y UV durante una hora con una concentración de 20 ppm de Naranja (II) (In situ).

Tabla 10. Resultados obtenidos del porcentaje de eficiencia del tratamiento.

Ci 20 PPM ABS 2.4217			
EXPERIMENTO	TIEMPO	ABS	% DE EFICIENCIA
1	10	2.2868	5.570467027
	20	2.2445	7.317173886
	30	2.2024	9.055622084
	40	2.1541	11.05008878
	50	2.135	11.83879093
	60	2.1267	12.18152537
2	10	2.0721	14.4361399
	20	2.0308	16.14155345
	30	2.0448	15.56344717
	40	2.0433	15.62538712
	50	2.1039	13.12301276
	60	2.1433	11.49605649
3	10	2.2093	8.77069827
	20	2.1705	10.37287856
	30	2.1748	10.19531734
	40	2.1761	10.14163604
	50	2.1761	10.14163604
	60	2.1761	10.14163604
4	10	2.4111	0.437709047
	20	2.3031	4.897386134
	30	2.2617	6.606929017
	40	2.2258	8.089358715
	50	2.1664	10.54218111
	60	2.13	12.04525746
5	10	0.2989	87.65743073
	20	0.0328	98.64557955
	30	0.0118	99.51273899
	40	0.0104	99.57054961
	50	0.0005	99.97935335
	60	0.0007	99.97109469
6	10	0.5043	79.17578561
	20	0.063	97.3985217
	30	0.0144	99.40537639
	40	0.0138	99.43015237
	50	0.0145	99.40124706
	60	0.0064	99.73572284

3.6 Caracterización del agua activada a través de agentes oxidantes

La tabla 11 a continuación muestra los datos obtenidos de 6 experimentos en el que se activan 200 mL de agua a través de la aplicación de ozono, peróxido de hidrógeno y luz ultravioleta durante una hora.

Tabla 11. Parámetros evaluados de una muestras de agua químicamente activada en 6 experimentos distintos.

Experimento	Ozono	H ₂ O ₂	UV	pH	Color UPC
				Media $\pm$ DS	
1	X	0.5 mL	X	8.01286 $\pm$ 0.1092	500
2	X	NO	NO	7.86571 $\pm$ 0.0207	500
3	X	1 mL	X	7.92143 $\pm$ 0.10746	500
4	X	1.5 mL	X	7.98 $\pm$ 0.0526	500
5	X	1.5 mL	X	7.26 $\pm$ 0.35515	0
6	X	1 mL	X	6.14571 $\pm$ 1.15649	0

La aplicación de ozono, peróxido de hidrógeno y luz ultravioleta en agua proporciona propiedades de desinfección y purificación en el tratamiento de agua para consumo y como método de depuración en aguas residuales tras eliminar olores, colores y sabores de ella, este tipo de procesos suele ser utilizado como alternativa efectiva y ecológica al uso de cloro y sus derivados para la desinfección y purificación del agua y aguas residuales.

Dado que se conoce que la muestra de agua a activar no contiene propiedades desinfectantes y purificantes, se le fue suministrado un flujo de 600 mg/h de gas ozono a través de un generador de ozono, esperando el agua presentara características desinfectantes.

La aplicación de peróxido de hidrógeno fue utilizada como oxidante en el proceso de oxidación química en el agua, con la finalidad de producir radicales hidroxilos (OH) con la capacidad de depurar los contaminantes presentes en el agua. Al inicio del experimento se le suministran ciertas cantidades de peróxido de hidrógeno y

con el paso del experimento se fueron tomando mediciones a través de tiras reactivas, obteniendo los siguientes datos.

Tabla 12. Concentración de peróxido de hidrógeno (H_2O_2) en una muestra de agua químicamente activada en 6 experimentos diferentes.

Experimento	H_2O_2	H_2O_2 Inicial (PPM)	H_2O_2 Final (PPM)
1	0.5 mL	50	30
2	NO	0	0
3	1 mL	50	30
4	1.5 mL	50	30
5	1.5 mL	50	30
6	1 mL	50	30

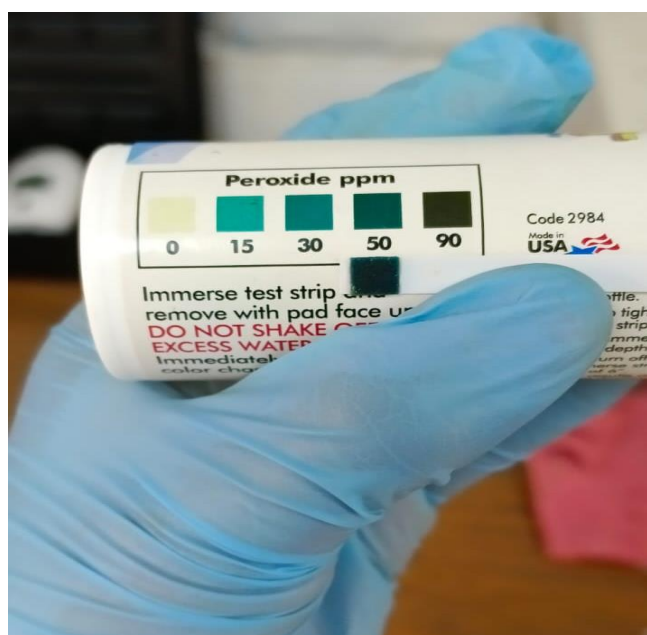


Figura 28. Toma de concentración de peróxido de hidrógeno de una muestra de agua químicamente activada.

Tabla 13. Concentración de dióxido de carbono (CO₂) en una muestra de agua químicamente activada en 6 experimentos diferentes.

Experimento	Ozono	H ₂ O ₂	UV	CO ₂ final (PPM)
1	X	0.5 mL	X	5
2	X	NO	NO	8
3	X	1 mL	X	9
4	X	1.5 mL	X	11
5	X	1.5 mL	X	14
7	X	1 mL	X	9

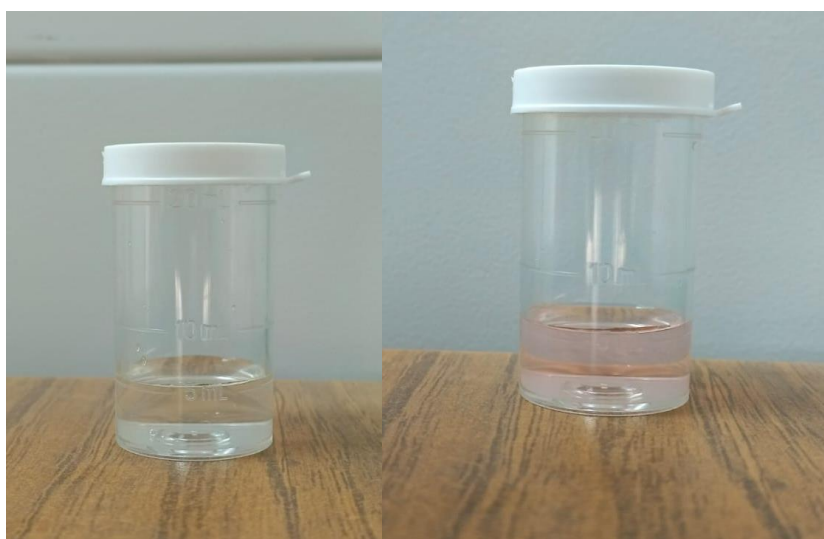


Figura 29. Muestras de agua activada químicamente, (A la izquierda se ve la muestra antes de la prueba de concentración de dióxido de carbono, a la derecha la muestra después de la prueba de concentración de dióxido de carbono).

Conclusiones

CONCLUSIONES

En el presente trabajo de investigación se reportaron y analizaron los resultados de supervivencia de las bacterias: *Staphylococcus aureus*, *Escherichia coli* y *Salmonella typhimurium* tras ser sometidas a un tratamiento de agua activada por plasma a distintos ciclos, entre ellos: 1 ciclo, 2 ciclos, 3 ciclos, 4 ciclos y 5 ciclos, previamente almacenada a 4°C tras su salida de un reactor de descarga de barrera dieléctrica con inyección de oxígeno.

Cumpliendo así el objetivo planteado de evaluación teórica y experimental del agua destilada tratada por plasma en la inactivación de bacterias, obteniendo que los resultados de supervivencia de microorganismos al tratamiento presentan cierta efectividad bactericida sin importar el número de ciclos a la que se es sometida, logrando inactivar en algunos casos hasta el 97% de la concentración bacteriana inicial.

Siendo así que las bacterias sometidas a un tratamiento con agua tratada por plasma presentan hasta un 97% (en algunos casos) de efectividad en su desactivación gracias a las propiedades físicas y químicas que adopta el agua, responsables de los efectos microbicidas en las bacterias, provocando una modificación en su composición ocasionando una muerte celular o desnaturalización de sus proteínas llevando así una inactivación en su reproducción y colocando este método como una tecnología significativa para la reducción de la carga microbiana.

Después de reportar y analizar el tratamiento de la fase química se obtiene que la combinación de agentes oxidantes en procesos de oxidación avanzada como métodos de activación de agua son factibles en la degradación de contaminantes químicos. Su eficiencia de degradación de contaminantes químicos en el tratamiento *in situ* logra un 99% de eficiencia sobre el 13% de un tratamiento *ex situ*, además se observó un cambio en la coloración de las muestras durante el tratamiento de 60 minutos, de un naranja a un amarillo y finalmente a un color transparente, indicando una máxima oxidación y mineralización del contaminante.

Recomendaciones

RECOMENDACIONES

Es importante mencionar que se observó que entre mayor sea el número de ciclos de tratamiento del agua por plasma su tiempo de vida incrementa, también se considera la importancia de realizar más estudios para corroborar este efecto y caracterizar los parámetros del agua a sus diferentes horas de almacenamiento según su número de ciclos para poder establecer un mecanismo de inactivación por este método.

Referencias

REFERENCIAS

- Baeza Oliete, G. (2017). *Contribución a la generación de plasma frío mediante electrodos SMD y JET* [Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Valencia].
- Bravo, Gavilán, J. A. (2016). *Plasmas generados con mezclas de gases Ar-N₂: aplicación en el área de materiales* [Archivo PDF].
- Brooks, G. F., Carroll, K. C., Butel, J. S., Morse, S. A., & Mietzner, T. A. (2014). *Microbiología médica de Jawetz, Melnick & Adelberg*. McGraw Hill Education.
- Castro López, C. R., & Castillo Rodríguez, L. M. (2024). *Contaminantes orgánicos persistentes: Impactos y medidas de control*. Manglar, 21(1), 135-148. <http://doi.org/10.57188/manglar.2024.014>
- Celestino Vázquez, J. (2023). *Análisis de propiedades fisicoquímicas del agua activada por plasma y su aplicación en la agricultura* [Tesis, Universidad Autónoma del Estado de Morelos].
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2019). *Usos del agua*. <https://www.gob.mx/conagua/acciones-y-programas/usos-del-agua>
- Endara, A. D. L. M. G., Heinert, M. E. J., & Solórzano, H. X. P. (2020). *Contaminación del agua y aire por agentes químicos*. Recimundo, 4(4), 79-93. [https://doi.org/10.26820/recimundo/4.\(4\).octubre.2020.79-93](https://doi.org/10.26820/recimundo/4.(4).octubre.2020.79-93)

- Fariñas, M. C., & Martínez-Martínez, L. (2013). *Infecciones causadas por bacterias gramnegativas multirresistentes: Enterobacterias, Pseudomonas aeruginosa, Acinetobacter baumannii y otros bacilos gramnegativos no fermentadores*. *Enfermedades Infecciosas y Microbiología Clínica*, 31(6), 402-409. <https://doi.org/10.1016/j.eimc.2013.03.016>
- Fernández Cirelli, A. (2012). *El agua: un recurso esencial*. *Química Viva*, 11(3), 147-170.
- García Morales, S. N. & Gómez Carranza, S. M. (2019). *Presencia de Pseudomonas aeruginosa, Escherichia coli, Klebsiella sp y Staphylococcus aureus meticilina resistente en superficies inanimadas de las áreas de Maternidad, Pediatría y Unidad de Cuidados Intensivos en Hospital General San Juan de Dios, Guatemala*. [Tesis, Universidad de San Carlos de Guatemala]. <https://biblioteca-farmacia.usac.edu.gt/Tesis/QB1223.pdf>
- Hernández Betancourt, O., Ulloa Cuesta, Y., Río Méndez, D. D., & Carmen Galdós, M. D. (2005). *Staphylococcus aureus y su identificación en los laboratorios microbiológicos*. revisión bibliográfica. *Archivo Médico de Camagüey*, 9(1), 142-152.
- Kopper, G., Calderón, G., Schneider, S., Domínguez, W. & Gutiérrez, G. (2009). *Enfermedades transmitidas por alimentos y su impacto socioeconómico*. [Archivo PDF] <https://www.fao.org/4/i0480s/i0480s.pdf>

- Lukes, P., Clupek, M., Babicky, V., & Sunka, P. (2008). *Ultraviolet radiation from the pulsed corona discharge in water. Plasma Sources Science and Technology.* 17(2). <https://dx.doi.org/10.1088/0963-0252/17/2/024012>
- López Pugni, G. S., Horst, F., Lassalle, V., Marchetti, S. G., & Ferreira, M. L. (2017). *Estudio exploratorio de catalizadores de oxidación nanoparticulados de bajo costo para la remoción de colorantes azoicos y antraquinóicos en soluciones modelo y mezclas.* En XX Congreso Argentino de Catálisis (CAC) (Córdoba, 1º al 3 de noviembre de 2017).
- López Ramírez, M. Á., Castellanos Onorio, O. P., Lango Reynoso, F., Castañeda Chávez, M. D., Montoya Mendoza, J., Sosa Villalobos, C. A., & Ortiz Muñiz, B. (2021). *Oxidación avanzada como tratamiento alternativo para las aguas residuales. Una revisión.* Enfoque UTE, 12(4), 76-87. <https://doi.org/10.29019/enfoqueute.769>
- López Sánchez, M., Romano Mendoza, E.L. & Triana Méndez, J. (2005). *El Agua* [Archivo PDF] <https://accedacris.ulpgc.es/bitstream/10553/253/1/495.pdf>
- López, M., Calvo, T., Prieto, M., Múgica-Vidal, R., Muro-Fraguas, I., Alba-Elías, F., & Alvarez-Ordóñez, A. (2019). *A review on non-thermal atmospheric plasma for food preservation: Mode of action, determinants of effectiveness and applications.* Frontiers in Microbiology, 10, 622. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2019.00622>

- Martínez, A. C., Olivares, C. C., Lozada, A. E., & Ramírez, C. G. (2014). *Contaminación generada por colorantes de la industria textil*. Vida Científica Boletín Científico de la Escuela Preparatoria No. 4, 2(3).
- Martínez, D. V. S. (2021). *Evaluación de riesgo ambiental por aguas negras en Tlaxcoapan, Hidalgo*. TEPEXI Boletín Científico de la Escuela Superior Tepeji del Río, 8(16), 31-33. <https://doi.org/10.29057/estr.v8i16.6428>
- Pabón, S. E., Benítez, R., Sarria, R. A., & Gallo, J. A. (2020). *Contaminación del agua por metales pesados, métodos de análisis y tecnologías de remoción*. Una revisión. Entre Ciencia e Ingeniería, 14(27), 9-18.
- Quispe, L. A. S., & Pinazo, S. B. B. (2021). *Degradación del fenol en aguas residuales de baños químicos portátiles del sector construcción mediante pseudomonas aeruginosa*. Revista de Investigaciones, 10(1), 15-25. <https://doi.org/10.26788/riepg.v10i1.2405>
- QUÍMICA SUASTES, S.S. DE C.V. (2018). *Hoja de datos de seguridad para el Naranja (II)* (Versión 02). https://reactivosmeyer.com.mx/datos/pdf/reactivos/hds_1770.pdf
- Urbina, J. A. J., & Solano, J. A. V. (2020). *Los contaminantes emergentes de las aguas residuales de la industria farmacéutica y su tratamiento por medio de la ozonización*. Informador técnico, 84(2), 249-263. <https://doi.org/10.23850/22565035.2305>

Xaubet Brea, M. N. (2018). *Estudio de descarga presión atmosférica para aplicaciones biológicas*. [Tesis Doctoral, Facultad de Ciencias Exactas Naturales. Universidad de Buenos Aires]
http://hdl.handle.net/20.500.12110/tesis_n6375_XaubetBrea

Zarzuela Aguilar, N. (2021). *Evaluación de la contaminación por pesticidas en aguas superficiales de España*. [Trabajo de Fin de Grado, Universidad de Jaén].