

VIABILIDAD DE LA CAVITACIÓN EN TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

Estudio de la viabilidad técnica de la cavitación en el tratamiento de aguas residuales para la
empresa AC Ingeniería Virtual

María Isabel Granados Alba y Laura Daniela Lemus Moreno

Trabajo de grado para obtener el título de Ingeniero Químico

Modalidad practica empresarial

Director

Hernando Guerrero Amaya

PhD. en Electroquímica, Ciencia y Tecnología

Tutor

Helver Crispiniano Álvarez Castro

PhD. en Ingeniería Química

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas

Escuela de Ingeniería Química

Bucaramanga

2024

VIABILIDAD DE LA CAVITACIÓN EN TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

Dedicatoria

Dedico este trabajo a mis padres Javier Granados y Martha Alba, quienes con amor incondicional y esfuerzo incansable me han brindado todo lo que necesito para ser quien soy hoy. Su sacrificio y apoyo constante han sido fundamentales en cada etapa de mi vida y mi formación académica. *Este logro es tanto suyo como mío.* A mis hermanos, por ser mi fuente constante de apoyo, alegría y motivación. A toda mi familia, por estar siempre a mi lado, brindándome su amor y respaldo incondicional. A mis amigos, por compartir momentos inolvidables, alegrías y desafíos. A todas las personas que han contribuido de manera especial a mi formación tanto personal como profesionalmente.

María Isabel Granados Alba

A Dios, por ser mi guía y fuente de fortaleza en cada momento de este camino. A mis queridos padres Héctor Lemus y Doris Moreno, cuyo amor, apoyo incondicional y sacrificio constante han sido la base sobre la cual he construido este logro. Gracias por enseñarme el valor del esfuerzo y la perseverancia. A mis sobrinos Salomé y Jerónimo, cuya alegría y energía me motivan a ser mejor cada día. A mi hermano Holman Lemus, por su compañía, consejos y palabras de aliento que me ayudaron a seguir adelante. A mi cuñada Karen Tauta, por su cariño, apoyo y comprensión, que han sido de gran ayuda durante este viaje. A mi familia, por ser parte fundamental de este proceso, brindándome su amor y apoyo en cada etapa de este viaje. A cada una de las personas que estuvieron apoyándome a lo largo de este proceso. Gracias por creer en mí, por sus palabras de ánimo y por estar siempre presentes.

Laura Daniela Lemus Moreno

Agradecimientos

Queremos expresar nuestro más sincero agradecimiento al Ph.D. Hernando Guerrero Amaya por su colaboración y disposición. Agradecemos también a la empresa A.C. Ingeniería Virtual, bajo la dirección del Ph.D. Helver Crispiniano Álvarez, por brindarnos la oportunidad de llevar a cabo este proyecto. De igual manera, un especial agradecimiento al Ing. Freddy Alexander Jara por su valiosa orientación y consejos, los cuales han enriquecido significativamente este trabajo. Finalmente, reconocemos con gratitud a la Bacter. Alejandra Velandia, al equipo del programa de innovación del SENA, Red Tecnoparque, y a todas las personas que, de una u otra manera, contribuyeron a la realización de este trabajo.

VIABILIDAD DE LA CAVITACIÓN EN TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

Contenido

Resumen.....	9
Abstract.....	10
Introducción	11
1. Objetivos.....	13
1.1 Objetivo general.....	13
1.2 Objetivos específicos	13
2. Marco conceptual.....	14
2.1 Aguas residuales	14
2.2 Tratamiento de aguas residuales	14
2.2.1 Tratamiento terciario.....	16
2.2.2 Desinfección de aguas residuales	16
2.4 Normativa	17
2.5 Cavitación	17
2.5.1 Cavitación Hidrodinámica rotativa.....	18
2.5.2 Variables operativas importantes en la cavitación hidrodinámica	19
2.5.3 Cavitación hidrodinámica rotativa como método de desinfección de aguas residuales	20
2.5.4 ARHCR: Advanced Rotational Hydrodynamic Cavitation Reactor	21
3. Estado del arte.....	22
4. Metodología	25
4.1 Revisión bibliográfica sobre la Tecnología ARHCR en general y su aplicación específica en el tratamiento de aguas residuales.	25
4.1.1 Investigación de información en la literatura relacionada con la cavitación en general.	25
4.1.2 Revisión Bibliográfica acerca de la técnica en el tratamiento de aguas residuales.	26
4.2 Determinación de las variables presentes en el proceso y selección de la variable respuesta para analizar su influencia.....	26
4.3 Familiarización con el sistema y pruebas experimentales exploratorias.	27
4.3.3 Etapas exploratorias.....	28
4.3.4 Análisis microbiológico	29
4.3.4.1 Preparación de diluciones seriadas	29
4.3.4.2 Siembra en placas de agar.....	30
4.4 Planteamiento del diseño experimental, selección de los factores y niveles a estudiar en el proceso.	31

VIABILIDAD DE LA CAVITACIÓN EN TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

4.5 Pruebas de acuerdo con el diseño experimental elegido y análisis microbiológico.	31
4.5.1 Pruebas experimentales.....	31
4.5.2 Análisis microbiológico	33
4.6 Comparación de alternativas de desinfección de aguas mediante una matriz comparativa.	33
4.6.1 Construir una matriz comparativa de las tecnologías empleadas en la desinfección de aguas residuales.....	34
5. Resultados y análisis.....	35
5.1 Resultados de las pruebas experimentales exploratorias.	35
5.2 Resultados de las pruebas experimentales basadas en el diseño experimental.....	37
5.2 Análisis estadístico.....	38
5.3 Análisis de pH, Temperatura y Corriente eléctrica	43
4.6.2 Matriz comparativa de tecnologías de desinfección para el tratamiento de aguas residuales.....	46
4.6.2 Resultados y Análisis de E_{EO} (Electric Energy per Order of Reduction)	48
6. Conclusiones	50
7. Recomendaciones	51
Referencias Bibliográficas	52
Apéndices.....	57

Lista de figuras

Figura 1. Esquema del tratamiento de aguas residuale	15
Figura 2. Reactor de cavitación hidrodinámica rotacional avanzado	21
Figura 3. Esquema metodológico	25
Figura 4. Esquema del sistema de cavitación hidrodinámica rotativa	27
Figura 5. Concentración de Escherichia Coli [UFC/mL] Vs Número de pasadas por el reactor de cavitación.....	40
Figura 6. Interacción de C/Co Vs Número de Pasadas por el reactor de cavitación.....	42
Figura 7. Relación pH y el Número de Pasadas por el reactor de cavitación.....	44
Figura 8. Relación Temperatura y el Número de Pasadas por el reactor de cavitación....	44
Figura 9. Relación de la corriente eléctrica y el Número de Pasadas por el reactor de cavitación.....	45
Figura 10. Resultados de pruebas experimentales.....	62
Figura 11. Resultados prueba normalidad y lognormalidad.....	63
Figura 12. Resultados Análisis estadístico.....	64
Figuras (13 – 41). Evidencias fotográficas.....	66

VIABILIDAD DE LA CAVITACIÓN EN TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

Lista de tablas

Tabla 1. Variables operativas en la cavitación hidrodinámica rotativa	19
Tabla 2. Resultados Reducción logarítmica pruebas exploratorias	36
Tabla 3. Resultados de la concentración de Escherichia Coli en cada uno de los niveles del número de pasadas por el reactor de Cavitación	37
Tabla 4. Resultados Reducción logarítmica en cada uno de los niveles del número de pasadas por el reactor de Cavitación	37
Tabla 5. Análisis estadístico Kruskal-Wallis.....	39
Tabla 6. Matriz comparativa de tecnologías de desinfección para el tratamiento de aguas residuales.....	46
Tabla 7. Resultados del parámetro EEO (Electric Energy per Order of Reduction) a 60 pasadas por el reactor de Cavitación hidrodinámica rotacional avanzado.....	49
Tabla 8. Contaminantes de importancia en aguas residuales	57
Tabla 9. Tecnologías utilizadas en el tratamiento terciario o avanzado.....	58
Tabla 10. Agentes infecciosos potencialmente presentes en aguas residuales domésticas no tratadas.....	59
Tabla 11. Parámetros fisicoquímicos y sus valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales de aguas residuales domésticas, (ARD) de las actividades industriales, comerciales o de servicios; y de las aguas residuales (ARD y ARND) de los prestadores del servicio público de alcantarillado a cuerpos de aguas superficiales.....	60
Tabla 12. Criterios de calidad del agua residual para el uso agrícola.	61

Tabla de Apéndices

Apéndice A. Contaminantes en aguas residuales.....	57
Apéndice B. Tecnologías tratamiento terciario.....	58
Apéndice C. Agentes infecciosos presentes en las aguas residuales	59
Apéndice D. Parámetros fisicoquímicos para vertimientos y reúso de agua.....	60
Apéndice E. Resultados datos pruebas experimentales	61
Apéndice F. Prueba de normalidad y lognormalidad, con el software GraphPad	63
Apéndice G. Estadística de Kruskal-Wallis	63
Apéndice H. Análisis estadístico GraphPad.....	64
Apéndice I. Preparación agua con <i>Escherichia Coli</i>	66
Apéndice J. Preparación de agua peptonada y agar chromocult.....	66
Apéndice K. Esterilización de material en Autoclave.	66
Apéndice L. Agar chromocult en las cajas petri.	67
Apéndice M. Montaje del proceso.	68
Apéndice N. Toma de muestras y datos.	69
Apéndice O. Preparación diluciones y siembra de muestras en medios de cultivo.....	70
Apéndice P. Incubación.....	71
Apéndice Q. Resultados.....	72
Apéndice R. Procedimiento del Método de Coloración Gram	72
Apéndice S. Comparación Microscópica de Muestras de Agua con E. coli: Antes y Después del Proceso de Cavitación	74

VIABILIDAD DE LA CAVITACIÓN EN TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

Resumen

Título: Estudio de la viabilidad técnica de la cavitación en el tratamiento de aguas residuales para la empresa AC Ingeniería Virtual. *

Autores: María Isabel Granados Alba, Laura Daniela Lemus Moreno. **

Palabras clave: Cavitación hidrodinámica, reactor de cavitación, desinfección de aguas residuales, *Escherichia coli*.

Descripción: AC Ingeniería Virtual, ubicada en Bucaramanga, Santander, se especializa en tecnología avanzada, incluyendo simulación computacional, visión e inteligencia artificial para procesos industriales. Recientemente, diseñó y construyó un reactor avanzado de cavitación hidrodinámica rotacional. Este reactor es una solución innovadora para el tratamiento de aguas residuales, ya que supera las limitaciones de los métodos convencionales de tratamiento terciario o avanzado. La cavitación hidrodinámica no requiere productos químicos adicionales y es más rápida. Esta tecnología tiene el potencial de ser aplicada en varios sectores industriales.

Este trabajo de grado se centró en evaluar la viabilidad técnica de la cavitación en la desinfección de aguas residuales, centrándose en la bacteria *Escherichia coli* como indicador de contaminación, se realizó un diseño experimental para determinar la influencia del número de pasadas por el ARHCR y se realizaron pruebas experimentales utilizando agua simulada preparada con agua del grifo y contaminada con una cepa pura de *Escherichia coli*, en lugar de utilizar agua doméstica real.

Los resultados demostraron una diferencia significativa en la reducción de la concentración de *Escherichia coli* al comparar 0 pasadas con 30, 45 y 60 pasadas por el ARHCR. A medida que se incrementaba el número de pasadas, se observó una disminución en la concentración de *Escherichia coli*. Finalmente, en base al análisis de datos obtenidos, se confirma que al aumentar el número de pasadas por el ARHCR se mejora la eficiencia del proceso de desinfección. En comparación con otras tecnologías, la cavitación hidrodinámica se destaca como la más efectiva debido a su alta eficiencia energética. Además, presenta costos operativos y de mantenimiento moderados. Es fácil de operar, no genera residuos, y su tiempo de proceso varía de minutos a horas, lo que la convierte en la opción más eficiente y viable para la desinfección de aguas residuales.

*Trabajo de grado.

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Director: Hernando Guerrero Amaya, Doctor en electroquímica ciencia y tecnología. Tutor: Helver Crispiniano Álvarez Castro, Doctor en ingeniería química.

Abstract

Title: Technical feasibility study of cavitation in wastewater treatment for the company AC Ingeniería Virtual. *

Authors: María Isabel Granados Alba, Laura Daniela Lemus Moreno. **

Keywords: Hydrodynamic cavitation, Cavitation reactor, Wastewater disinfection, , *Escherichia coli*.

Description: AC Ingeniería Virtual, located in Bucaramanga, Santander, specializes in advanced technology, including computer simulation, vision and artificial intelligence for industrial processes. Recently, it designed and built an advanced rotational hydrodynamic cavitation reactor. This reactor is an innovative solution for wastewater treatment, as it overcomes the limitations of conventional tertiary or advanced treatment methods. Hydrodynamic cavitation does not require additional chemicals and is faster. This technology has the potential to be applied in various industrial sectors.

This degree work focused on evaluating the technical feasibility of cavitation in wastewater disinfection, focusing on *Escherichia coli* bacteria as an indicator of contamination, an experimental design was performed to determine the influence of the number of passes through the ARHCR and experimental tests were conducted using simulated water prepared with tap water and contaminated with a pure strain of *Escherichia coli*, instead of using real domestic water.

The results showed a significant difference in the reduction of *Escherichia coli* infection concentration when comparing 0 passes with 30, 45 and 60 passes through the ARHCR. As the number of passes increased, a decrease in *Escherichia coli* concentration was observed. Finally, based on the data analysis obtained, it is confirmed that increasing the number of passes through the ARHCR improves the efficiency of the disinfection process. Compared to other technologies, hydrodynamic cavitation stands out as the most effective due to its high energy efficiency. In addition, it has moderate operating and maintenance costs. It is easy to operate, generates no waste, and its process time varies from minutes to hours, making it the most efficient and viable option for wastewater disinfection.

*Degree work.

** Faculty of Physicochemical Engineering, School of Chemical Engineering. Director: Hernando Guerrero Amaya, PhD in electrochemical science and technology. Tutor: Helver Crispiniano Álvarez Castro, PhD in chemical engineering.

Introducción

AC Ingeniería Virtual fue fundada en el 2012, es una empresa dedicada a la ingeniería computacional en la industria 4.0, se especializa en el modelamiento, simulación y virtualización de procesos industriales, utilizando tecnologías de vanguardia en simulación numérica, prototipado, automatización e inteligencia artificial. La misión de la empresa es conectar el conocimiento desarrollado en instituciones de investigación y desarrollado con su aplicación práctica en el sector industrial. Recientemente la empresa desarrollo el diseño y construcción de un reactor de cavitación hidrodinámica rotacional avanzado para evaluar su viabilidad en el tratamiento de aguas residuales, específicamente en la desinfección de patógenos. Este proyecto representa su compromiso continuo con la innovación y la búsqueda de soluciones sostenibles para los desafíos industriales contemporáneos (ACIV, s. f.).

Las aguas residuales se deben a la degradación de la calidad del agua que se ve afectada por las actividades humanas. En América Latina, alrededor de 75% de las aguas residuales son vertidas en fuentes de agua naturales sin tratamiento previo, esto provoca problemas en la calidad del agua, lo que tiene un impacto significativo (Blanco-Corredor et al., 2021). Según el Estudio Nacional de Agua de 2022, el 30 % de las aguas residuales recibe tratamiento. Además, la eficiencia en la eliminación de la carga contaminante de aguas residuales de origen doméstico es menor del 45% (Instituto de Hidrología, 2022).

Actualmente los procesos convencionales del tratamiento terciario de aguas residuales resultan ineficientes para hacer frente a contaminantes debido a que pueden resistir mayores temperaturas, presión e interacción química, estos contaminantes consumen más energía y requieren más esfuerzo para separarse del fluido (Darandale et al., 2023). La cavitación, aunque

VIABILIDAD DE LA CAVITACIÓN EN TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

no es nueva en la industria de procesos, es un fenómeno donde la presión cae por debajo del punto de vaporización del líquido, generando cavidades en la fase líquida. Este fenómeno se conoce como cavitación hidrodinámica y puede ser una alternativa para mejorar la eficiencia en el tratamiento de aguas contaminadas (Anasori Movahed et al., 2023).

La cavitación hidrodinámica al no requerir uso de productos químicos adicionales y utiliza una cantidad de energía significativamente menor en comparación con otros métodos, muestra su gran potencial para ser llevada a escala industrial (Petkovšek et al., 2015). Por lo tanto, este trabajo se centra en evaluar la viabilidad técnica de la cavitación en la desinfección de aguas residuales utilizando el reactor de cavitación hidrodinámica rotacional avanzado diseñado por la empresa, empleando un diseño experimental en el cual se utilizó agua simulada preparada con agua del grifo y contaminada con la bacteria *Escherichia coli*, con el fin de encontrar la influencia del tiempo de cavitación y/o número de pasadas por el reactor de cavitación en la eficacia del proceso de desinfección del agua.

1. Objetivos

1.1 Objetivo general

Evaluar la tecnología de cavitación como método de desinfección para el tratamiento de aguas residuales.

1.2 Objetivos específicos

- Determinar las principales variables operativas de la tecnología ARHCR y su influencia en la desinfección de aguas de tipo residual.
- Realizar un diseño experimental para determinar la influencia de las variables en la desinfección de aguas residuales.
- Comparar la tecnología de cavitación con respecto a otras tecnologías realizando una matriz.

2. Marco conceptual

El tratamiento efectivo de aguas residuales es un desafío crítico en la gestión ambiental y la sostenibilidad del agua. En este contexto, la cavitación emerge como una tecnología innovadora con el potencial de mejorar significativamente la eficiencia y la eficacia de los procesos de desinfección de aguas residuales (Arrojo et al., 2008).

2.1 Aguas residuales

Las aguas residuales son el resultado del uso del agua y los sólidos por la acción humana, y son transportadas a través del sistema de alcantarillado.

En términos generales, las aguas residuales domésticas (ARD) comprenden los líquidos procedentes de viviendas, edificios comerciales e institucionales. Las aguas residuales pluviales son resultantes de la escorrentía superficial. Por otro lado, las aguas residuales industriales son aquellas provenientes de las descargas de industrias manufactureras, dentro de ellas se encuentran las aguas residuales agrícolas, que son las aguas utilizadas en la agricultura para riego de cultivos, las cuales pueden contener diversos nutrientes y productos químicos utilizados en la agricultura, como fertilizantes y pesticidas, y que también contribuyen a la contaminación del agua cuando se descargan en el medio ambiente (Romero Rojas, 2004). Algunos de estos impactos negativos se observan en la Tabla 8, (Ver Apéndice A)

2.2 Tratamiento de aguas residuales

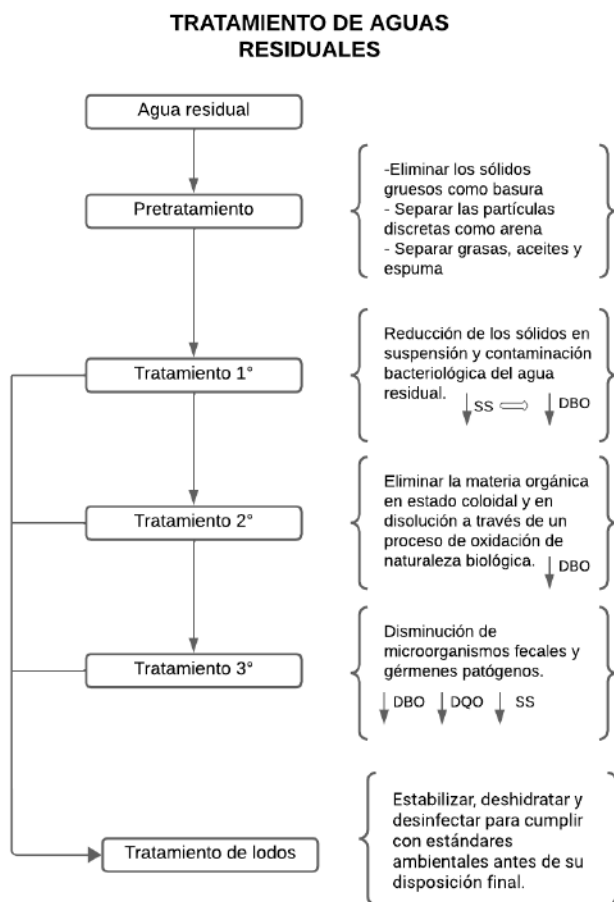
Las aguas residuales generadas por las actividades domésticas e industriales deben ser tratadas antes de ser descargadas, debido a que estas poseen diferentes tipos de contaminantes (Ver figura 1).

VIABILIDAD DE LA CAVITACIÓN EN TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

El proceso comienza con una etapa inicial donde predominan los fenómenos físicos, correspondientes a las operaciones unitarias. Luego, se implementan procesos químicos y biológicos, conocidos como procesos unitarios, para eliminar las partículas sólidas suspendidas en el agua. Típicamente, se realiza una combinación de diferentes procesos y operaciones unitarias. La aplicación de estos dará lugar a los tratamientos preliminares, primarios, secundarios y terciarios del agua residual (Metcalf & Eddy, 1996a). En las figuras 1 se observa los tratamientos y su principal objetivo.

Figura 1

Esquema del tratamiento de aguas residuales.



Nota. Adaptado de (Garay, 2016).

VIABILIDAD DE LA CAVITACIÓN EN TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

2.2.1 Tratamiento terciario.

Este tratamiento representa la última fase del proceso, en la cual se aplican procedimientos adicionales para eliminarla carga orgánica residual y otras sustancias contaminantes no eliminadas en los tratamientos previos tales como nitrógeno y fósforo que son sustancias que tienen importantes efectos sobre los ecosistemas y la salud pública, pero no ha sido ampliamente adoptado debido a su alto costo (Troconis, 2010).

Los procesos terciarios generalmente combinan diferentes tecnologías para maximizar la eficiencia en la eliminación de estos contaminantes. Esta integración de métodos permite una purificación más completa del agua, asegurando su calidad y seguridad para diversos usos. A continuación, en la Tabla 9 (Ver Apéndice B) se presenta una descripción detallada de diversas tecnologías utilizadas en la fase final del tratamiento de agua. Cada tecnología está diseñada para maximizar la eficacia en la purificación del agua, asegurando así su calidad y seguridad para múltiples aplicaciones. Este trabajo se centró en el proceso terciario del tratamiento de aguas residuales utilizando la tecnología de cavitación hidrodinámica centrándose en la desinfección.

2.2.2 Desinfección de aguas residuales

La desinfección implica la eliminación selectiva de los microorganismos responsables de enfermedades. Se pueden identificar tres grupos principales de organismos entéricos de origen humano: bacterias, virus y quistes amebianos. Es importante distinguir el concepto de desinfección de la esterilización, ya que esta última implica la eliminación completa de todos los microorganismos (Metcalf & Eddy, 1977). En la Tabla 10 (Ver Apéndice C) se observan los principales agentes infecciosos presentes en aguas residuales domésticas no tratadas.

VIABILIDAD DE LA CAVITACIÓN EN TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

2.4 Normativa

Las regulaciones que norman los tratamientos de aguas residuales se basan en las tasas de remoción de materia orgánica, sólidos suspendidos y patógenos presentes en dichas aguas. Gran parte de las normativas más recientes y estrictas también incorporan el control de la eliminación de nutrientes y contaminantes prioritarios, una de ellas es la resolución 631 de 105, “por la cual se establecen los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público y se dictan otras disposiciones” Ver Tabla 11 (Apéndice D) (MinAmbiente, 2015a). En la tabla 3 se observan estos parámetros. Cuando el objetivo es la reutilización del agua residual tratada, los requisitos normativos son el Decreto 1076 de 2015 (Decreto 3930 de 2010) que “promueve el Reúso de las Aguas Residuales a través de los Planes de Reconversión a Tecnologías Limpias en Gestión de Vertimientos” y lo incluye en la gradualidad para el cumplimiento de la norma de vertimientos Ver Tabla 12 (Ver Apéndice D) (MinAmbiente, 2015b).

2.5 Cavitación

La cavitación es un fenómeno de formación, crecimiento y colapso de cavidades llenas de vapor (microburbujas) dentro de un líquido. Se forma cuando la presión local cae por debajo de la presión de vaporización. La implosión de estas burbujas ocurre en períodos de mili o microsegundos, liberando una gran cantidad de energía en un lapso muy breve. Esta descarga energética conlleva la aparición de altas temperaturas y presiones locales elevadas en el sistema, cuyos efectos térmicos y mecánicos facilitan la transformación de diferentes matrices de interés (Ranade et al., 2022).

VIABILIDAD DE LA CAVITACIÓN EN TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

Para estudiar y analizar este fenómeno, es fundamental comprender la vía de formación de las burbujas o cavidades. Esto ocurre mediante la generación inducida de un pulso de presión, cuya intensidad, comportamiento y efectos varían dependiendo del tipo de proceso realizado (Gutiérrez-Mosquera et al., 2019). La literatura reporta cuatro técnicas que involucran cavitación: hidrodinámica, acústica o ultrasónica, óptica y por partículas. De estas, las más utilizadas son la cavitación hidrodinámica y la ultrasónica, debido a que generan una mayor cantidad de burbujas en el fluido, favorecen las modificaciones químicas y/o físicas, poseen un adecuado potencial de escalamiento, y cuentan con un alto grado de desarrollo tecnológico asociado (Ozonek, 2012).

2.5.1 Cavitación Hidrodinámica rotativa

En el proceso hidrodinámico, la cavitación se origina al presentarse una disminución o caída repentina de la presión, causada por las condiciones del flujo, la configuración geométrica del sistema de transporte o bajo el efecto de influencias y fuerzas externas (Gutiérrez-Mosquera et al., 2019). En este caso, la cavitación hidrodinámica rotativa es un tipo específico de cavitación hidrodinámica que se produce cuando un líquido es sometido a fuerzas de rotación (Ranade et al., 2022).

El mecanismo fundamental de la cavitación hidrodinámica rotativa se basa en la disminución de la presión estática en la superficie de los componentes giratorios debido a la rotación. Cuando la velocidad de rotación es suficientemente alta, la presión local puede caer por debajo de la presión de vapor del líquido, lo que conduce a la formación de burbujas o cavidades de vapor (Jyoti & Pandit, 2001). Estas burbujas de vapor son posteriormente transportadas hacia regiones de mayor presión, donde colapsan violentamente, liberando una gran cantidad de energía en forma de ondas de choque y microcorrientes de alta velocidad (Ranade et al., 2022).

VIABILIDAD DE LA CAVITACIÓN EN TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

2.5.2 Variables operativas importantes en la cavitación hidrodinámica

A continuación, se describen las variables operativas más importantes en la cavitación hidrodinámica.

Tabla 1

Variables operativas en la cavitación hidrodinámica rotativa.

Variable	¿Qué es?	Efecto de la variable
Velocidad de rotación	Se refiere a la velocidad a la que se hace girar el fluido dentro del reactor.	Esta velocidad de rotación puede influir en la generación y distribución de las burbujas de cavitación en el líquido, lo que a su vez afecta la intensidad de la cavitación y la eficacia del proceso de desinfección.
Número de pasadas	Es la cantidad de veces que se recircula el fluido en el reactor durante el proceso.	Mejora la eficiencia de desinfección al aumentar la exposición de microorganismos a condiciones extremas, optimiza la distribución de energía para una desinfección uniforme y completa, y puede reducir costos operativos al utilizar de manera más eficiente los recursos y la energía.
Temperatura	Se refiere a la temperatura del líquido en el reactor.	A medida que la temperatura aumenta, la intensidad de la cavitación primero aumenta, pero luego disminuye después de alcanzar una temperatura máxima entre 50°C y 70°C. Esto se debe a que las altas temperaturas pueden generar demasiadas burbujas de gas, lo que resulta en una menor liberación de energía durante el colapso de las burbujas.
Presión	Se refiere a las condiciones de presión generadas dentro del reactor durante el tratamiento.	Afecta en la formación y el colapso de burbujas de vapor en el líquido, lo que influye en la eficacia de desinfección y la eficiencia del proceso. Presiones más bajas favorecen la formación de burbujas, su colapso violento y la generación de condiciones extremas que contribuyen a la desinfección del agua.
Duración del tratamiento	Es el tiempo durante el cual el agua se expone a las condiciones de cavitación en el reactor.	Puede formar subproductos orgánicos estables y venenosos. Sin embargo, cuando la concentración se reduce a un valor extremadamente bajo durante el tratamiento, la duración del tratamiento no afecta la tasa de desinfección.
Potencia del reactor	Cantidad de energía necesaria para generar y mantener la cavitación en el sistema.	Aumentar la potencia del reactor en el proceso de cavitación hidrodinámica intensifica la cavitación, mejora la destrucción de microorganismos y acelera la velocidad de desinfección.
Porcentaje de desinfección	Indica la capacidad del proceso de desinfección para reducir la carga microbiana.	Al aumentar el porcentaje de desinfección se mejora la eficiencia del tratamiento al lograr una mayor eliminación de microorganismos y mejorar la calidad del agua tratada.
Número de cavitación	El número de cavitación se refiere a la relación entre la	Afecta la probabilidad de formación de burbujas de vapor en un líquido durante el proceso de cavitación. Un número

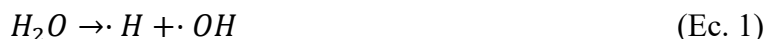
VIABILIDAD DE LA CAVITACIÓN EN TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

presión dinámica y la presión alto aumenta el riesgo de cavitación, lo que puede tener de vapor en un sistema de efectos positivos o negativos en el proceso, dependiendo flujo, y se utiliza para de cómo se controle. determinar la probabilidad de formación de cavitación en una determinada situación.

Nota: Adaptado de (Sun et al., 2020).

2.5.3 Cavitación hidrodinámica rotativa como método de desinfección de aguas residuales

La implosión de las burbujas genera áreas extremadamente calientes conocidas como "hot spots", con temperatura y presiones altas. Estos puntos calientes contribuyen a la degradación de los contaminantes, ya sea mediante la generación de radicales oxidantes o mediante craqueo y pirólisis a alta temperatura. Algunas reacciones clave se muestran en las ecuaciones 1 a la 8 (Ranade et al., 2022).



En circunstancias de condiciones extremas, las moléculas de agua se dividen en fragmentos reactivos llamados radicales H y OH . Estos radicales se dispersan a través del líquido y reaccionan con los contaminantes orgánicos presentes, provocando su oxidación o mineralización. En el proceso de cavitación hidrodinámica, hay dos mecanismos principales que degradan los contaminantes. Uno es la descomposición térmica (pirólisis) de las moléculas de contaminantes volátiles atrapadas dentro de las cavidades durante su colapso. El otro mecanismo, para

VIABILIDAD DE LA CAVITACIÓN EN TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

contaminantes no volátiles, ocurre cuando los radicales de hidroxilo atacan las moléculas de los contaminantes en la interfaz entre el agua y las cavidades (Ozonek, 2012).

La implementación de la cavitación hidrodinámica para el tratamiento de agua es bastante sencilla y requiere esencialmente una bomba, un dispositivo de cavitación y, como máximo, un tanque de retención (Ranade et al., 2022).

2.5.4 ARHCR: Advanced Rotational Hydrodynamic Cavitation Reactor

La empresa AC Ingeniería Virtual desarrolló y fabricó un innovador reactor de cavitación hidrodinámica rotacional avanzado, un progreso significativo en el campo del tratamiento de aguas residuales. En este trabajo de grado, se propone evaluar la viabilidad técnica de este equipo para la desinfección de aguas residuales. Este estudio buscará determinar la eficacia del reactor en la eliminación de contaminantes con el fin de proporcionar datos precisos y fundamentados que contribuyan al avance y la aplicación exitosa de esta tecnología en la industria del tratamiento de aguas residuales.

Figura 2

Reactor de cavitación hidrodinámica rotacional avanzado



3. Estado del arte

La búsqueda de métodos innovadores para el tratamiento de aguas residuales ha llevado a la exploración de la cavitación como una alternativa viable para la descomposición de contaminantes orgánicos y la eliminación de microorganismos patógenos en aguas residuales (Lafuente Flores & López Cevallos, 2018).

A nivel internacional, se han realizado estudios desde hace años, un ejemplo es el artículo realizado por Luis Carecedo junto a otros investigadores, en 2018, estudiaron la eficiencia de un dispositivo rotor-estator para la desinfección de agua infectada con *E.coli* y *E.fecalis* basado en cavitación hidrodinámica, llevaron a cabo análisis paramétricos cambiando el diámetro del rotor y realizaron diversas geometrías del canal de cavitación, se utilizaron espectros de presión acústica para evaluar la intensidad de la implosión en el proceso y realizaron micro siembra a cada una de las muestras una vez finalizado el tratamiento. Como resultado se obtuvo muerte bacteriana en menos de 10 min de tiempo de tratamiento y para una mayor desinfección se debe aumentar el número de eventos de cavitación, por último, los autores apuntan que el consumo de energía presente en el dispositivo giratorio fue menor que el de otros equipos alternativos de cavitación empleados por otros investigadores (Cerecedo et al., 2018).

Otro estudio realizado, en el año 2021, explora la cavitación hidrodinámica (CH) como una prometedora estrategia para el tratamiento de aguas residuales, destacando su importancia como un proceso avanzado de oxidación. Los autores Baowei Wang, Huijuan Su y Bo Zhang han contribuido significativamente a este campo, destacan que es de gran importancia considerar factores como el pH y la naturaleza de los contaminantes para optimizar la eficiencia del tratamiento. Los resultados de su investigación revelan una reducción del 56% en el DQO y una

VIABILIDAD DE LA CAVITACIÓN EN TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

eficiencia energética de 4.67×10^{-6} mg/J, evidenciando la influencia del tiempo de tratamiento en la efectividad del proceso. Los autores resaltan la formación de cavitación, la cual es influenciada por diversos parámetros geométricos y condiciones operativas. El diseño de estos reactores CH tipo Venturi y orificio, en términos de la relación longitud/diámetro del orificio y el ángulo de divergencia, impacta significativamente en la eficacia de la cavitación, mencionan que un mayor ángulo de divergencia en los reactores Venturi puede aumentar la eficiencia de la cavitación, aunque un ángulo excesivamente grande puede provocar una ruptura prematura de las burbujas de cavitación (Wang et al., 2021).

En 2022, Ashish V. Mohod y otros autores, realizaron un estudio en el cual destacan la cavitación hidrodinámica como una tecnología prometedora para la eliminación de productos químicos dañinos y tóxicos de las aguas residuales, la cavitación hidrodinámica, especialmente cuando es combinada con otros procesos avanzados de oxidación, demostró una significativa intensificación del proceso de degradación de contaminantes en aguas residuales. Se observó que la configuración tipo Venturi proporciona un 10-30% más de degradación en comparación con una configuración de orificio (Mohod et al., 2023).

A nivel nacional, se han realizado investigaciones respecto al uso de la cavitación hidrodinámica en aplicaciones diversas, incluyendo el tratamiento de aguas residuales. Un ejemplo fue el estudio realizado por Esteban Lafuente y Héctor López en 2018, en el cual se realizaron experimentos donde se trató agua variando la presión de descarga, pero manteniendo el mismo tiempo del proceso. La concentración inicial de bacterias y el tipo de bacteria presente, en este caso, *Escherichia coli*, son factores determinantes que influyen en la eficacia del tratamiento. Los resultados mostraron que, al aumentar la presión de descarga del cavitador, también se incrementó la eficiencia de desinfección (Lafuente Flores & López Cevallos, 2018).

VIABILIDAD DE LA CAVITACIÓN EN TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

Basándose en estos hallazgos, los investigadores concluyeron que la cavitación hidrodinámica es más efectiva cuando se utilizan configuraciones y parámetros de operación que favorecen la formación de burbujas grandes y un mayor número de eventos de cavitación (Arrojo et al., 2008).

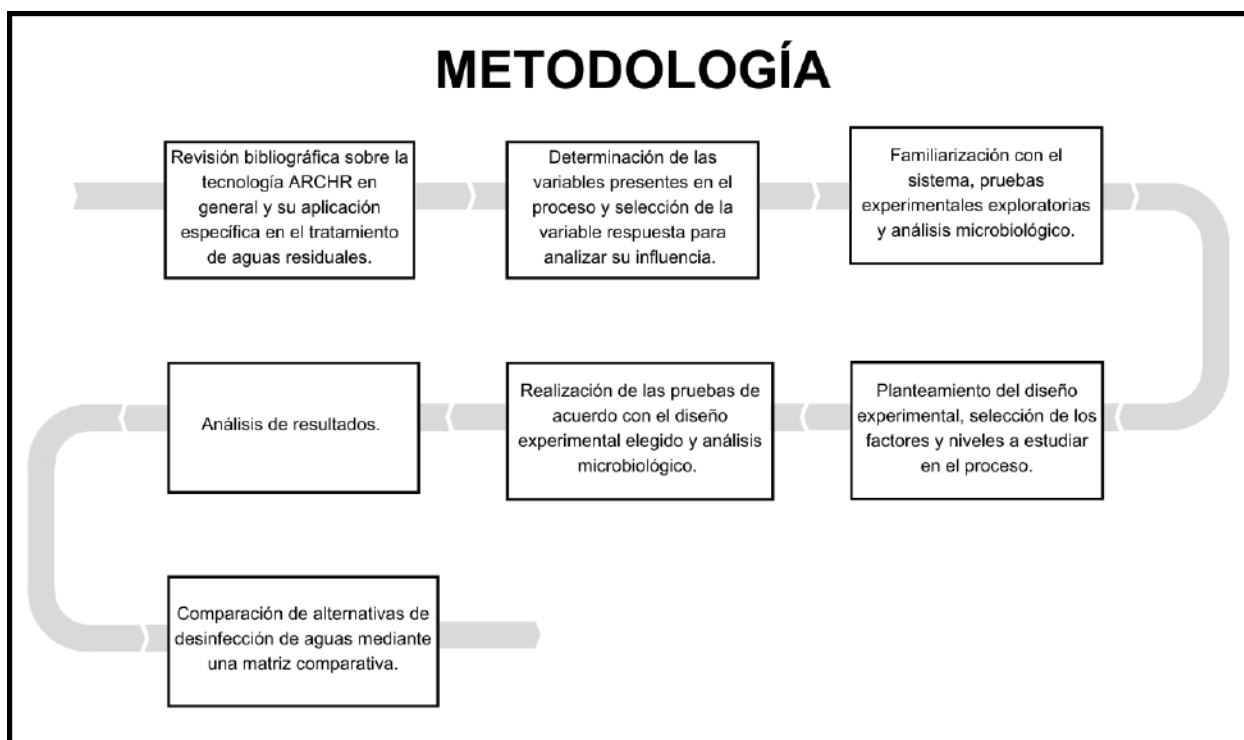
Finalmente, con este trabajo se espera aportar una comprensión más profunda de cómo la cavitación puede utilizarse en el tratamiento de aguas residuales, ofreciendo una solución viable para la reducción de contaminantes y el cumplimiento de estándares ambientales abriendo puertas a un tratamiento eficaz y sostenible en beneficio de la sociedad y el medio ambiente.

4. Metodología

La práctica empresarial se desarrolló conforme a los objetivos propuestos, avanzando integralmente. La Figura 3 muestra el desarrollo metodológico general.

Figura 3

Esquema metodológico



4.1 Revisión bibliográfica sobre la Tecnología ARHCR en general y su aplicación específica en el tratamiento de aguas residuales.

4.1.1 Investigación de información en la literatura relacionada con la cavitación en general.

Mediante exploración en diferentes fuentes bibliográficas como libros, sitios web, artículos, entre otros, se recopiló información del fundamento teórico de la cavitación, las variables

VIABILIDAD DE LA CAVITACIÓN EN TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

presentes en el fenómeno, dónde y cómo surge, además de cómo puede esta técnica ser una herramienta aprovechable a gran escala para diversas aplicaciones industriales.

4.1.2 Revisión Bibliográfica acerca de la técnica en el tratamiento de aguas residuales.

Se realizó una búsqueda bibliográfica en donde se logró obtener una visión amplia de la técnica de cavitación hidrodinámica y como puede ser una alternativa para tratar aguas residuales y el enfoque se realizó en la preparación de agua simulada con una concentración de *Escherichia Coli* similar a la de un agua de origen doméstico. Se identificó aquellos parámetros de calidad con los que se debe verter el agua en las fuentes hídricas después de su tratamiento o posterior reúso del agua para actividades agrícolas según la normativa colombiana.

4.2 Determinación de las variables presentes en el proceso y selección de la variable respuesta para analizar su influencia.

Se consideraron diversas variables operativas que podrían influir en el proceso de cavitación (Ver Tabla 1), a partir de la revisión de la literatura, se concluyó que el **número de pasadas del fluido a través del reactor** era una variable clave debido a que la repetida exposición del fluido a los efectos de la cavitación debería, teóricamente, aumentar la eficacia del proceso de desinfección, afectando la reducción de la concentración de microorganismos. Por tanto, se seleccionó como variable respuesta la **reducción bacteriana**, medida como la concentración de bacterias (UFC/mL) tras el tratamiento. Esta decisión se fundamentó en la necesidad de tener un indicador claro y específico de la eficacia del reactor en términos de desinfección. La reducción bacteriana refleja de manera directa el objetivo del tratamiento: minimizar la concentración de microorganismos presentes en el agua residual.

VIABILIDAD DE LA CAVITACIÓN EN TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

4.3 Familiarización con el sistema y pruebas experimentales exploratorias.**4.3.1 Montaje del sistema**

El montaje del sistema comenzó con la disposición de los materiales conforme al plano técnico suministrado por la empresa. Se procedió con la limpieza y ensamblaje de las tuberías, las cuales fueron conectadas mediante un recipiente, formando así un circuito cerrado. Se fabricó una base de madera para el reactor de cavitación y el motor, garantizando su estabilidad estructural durante la operación. Posteriormente, se completó el ensamblaje conectando las tuberías al reactor de cavitación y asegurando una correcta integración con el motor. Finalmente, se llevaron a cabo pruebas hidrodinámicas para verificar la ausencia de fugas, asegurando así la integridad del sistema antes de su puesta en marcha.

Figura 4.

Esquema del sistema de cavitación hidrodinámica rotativa



Nota: El sistema está conformado por: (1) Recipiente de almacenamiento, (2) válvulas de paso, (3) ARHCR, (4) Motor eléctrico de 1 Hp.

VIABILIDAD DE LA CAVITACIÓN EN TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

Se puso en marcha el sistema y se midió el caudal del ARHCR, obteniendo un caudal de 0.0267 L/s, el volumen de agua utilizado es de 7 L.

$$Q = \frac{n_p * V}{t} \quad (\text{Ec. 9})$$

Donde n_p es el número de pasadas, V el volumen y t el tiempo de proceso. (Mane et al., 2020).

4.3.2 Preparación del agua

La etapa de experimentación comenzó con la preparación del agua simulada, la búsqueda de información arrojó que en un agua residual hay aproximadamente 1×10^9 NMP/100 mL de *Escherichia coli*, para obtener la cantidad de agua necesaria para poner en funcionamiento el sistema con una alta concentración bacteriana se disolvieron 90 mL de caldo de *Escherichia coli* en 7 (L) litros de agua, y se dejó reposar durante cuatro (4) días.

4.3.3 Etapas exploratorias

En este estudio, inicialmente se llevaron a cabo etapas exploratorias para determinar las condiciones óptimas de operación del ARHCR. Se llevo a cabo una primera prueba exploratoria inicial para determinar si el equipo de cavitación funcionaba de manera correcta, dado que era la primera vez que se utilizaba. Para ello, se planteó una duración corta de 30 minutos con el fin de observar el funcionamiento del equipo. Para ello se tomaron dos muestras de 20 mL, en el tiempo inicial y final respectivamente ($t=0$, $t=30$) y se realizó el análisis microbiológico descrito en la siguiente sección.

VIABILIDAD DE LA CAVITACIÓN EN TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

Debido a la novedad del equipo y la falta de datos específicos, se consultaron artículos científicos relevantes para establecer un punto de partida sobre el número de pasadas necesarias para lograr reducciones significativas de *E. Coli*. Estos estudios (Petkovšek et al., 2015), (Dular et al., 2016), (Burzio et al., 2020), indicaron que con 30 pasadas se lograba una reducción de concentración bacteriana significativa. Por tanto se realizaron otras pruebas preliminares con diferentes números de pasadas (30, 45, y 60) en experimentos separados y esto permitió optimizar el uso de tiempo y recursos. Cada experimento proporcionó información crítica sobre un punto específico del rango de operación del reactor de cavitación.

Con base en estos hallazgos preliminares, se diseñó el experimento formal para evaluar sistemáticamente la efectividad del reactor en diferentes condiciones de tiempo/pasadas.

4.3.4 Análisis microbiológico

Las muestras para análisis biológico se tomaron antes de la exposición a la cavitación y después, con el fin de observar el potencial de desinfección de *Escherichia coli*. Se compararon las concentraciones de estos microorganismos antes y después de la prueba, teniendo en cuenta la variación de los parámetros aplicados (Número de pasadas). Para este análisis, se siguió el siguiente procedimiento en cada una de las pruebas experimentales realizadas.

4.3.4.1 Preparación de diluciones seriadas

1. Preparar solución de Agua peptonada.
2. Colocar los frascos de medios de cultivo, agua peptona, tubos de ensayo, pipetas y puntas de micropipetas dentro del AUTOCLAVE para proceso de esterilización.

VIABILIDAD DE LA CAVITACIÓN EN TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

3. Etiquetar tubos de ensayo con los números de dilución correspondientes y poner una gradilla de manera ordenada. Se utilizó un codificado para cada muestra (t_0-D^{-1}) siendo t_0 el tiempo de cavitación, y D^{-1} : Dilución de la muestra.
4. Agregar 9 mL de solución de Agua de Peptona Tamponada a todos los tubos de ensayo y cerrar el tubo.
5. Transferir 1 mL de la muestra obtenida del tanque almacenamiento del sistema al primer tubo de ensayo y mezclar para obtener una dilución 1:10.
6. Repetir el proceso de transferencia del tubo anteriormente mezclado al siguiente tubo para obtener diluciones adicionales hasta 1×10^{-8} .
7. Homogenizar cada dilución mediante agitación suave.

4.3.4.2 Siembra en placas de agar

1. Preparar cajas petri de agar nutritivo estériles.
2. Transferir 12 μ L de cada dilución a una caja petri utilizando la técnica de siembra en superficie con una micropipeta estéril (MICROPIPETA MICROPETTE DLAB).
3. Extender uniformemente el líquido en la superficie del agar mediante el método de vertido en placa.
4. Dejar que las cajas se sequen completamente antes de incubarlas.
5. Sellar las cajas petri con Parafilm e incubar en el INCUBADOR IN30 las cajas petri boca abajo para evitar condensación a la temperatura y durante el tiempo adecuados para el crecimiento de bacterias (37°C durante 24 horas para *Escherichia coli*). (American Public Health Association, 2017)
6. Controlar periódicamente las cajas durante la incubación para detectar la presencia de colonias bacterianas.

VIABILIDAD DE LA CAVITACIÓN EN TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

4.4 Planteamiento del diseño experimental, selección de los factores y niveles a estudiar en el proceso.

Una vez seleccionados los factores y niveles, se optó por el tipo de diseño experimental que mejor se adecuara a la finalidad del presente trabajo: Evaluar el efecto del número de pasadas por el reactor de cavitación hidrodinámica rotativa en la reducción de concentración bacteriana de *Escherichia Coli* en el agua simulada, controlando la variabilidad entre experimentos independientes. Por esta razón, se eligió el diseño de bloques completos aleatorizados (RCBD, *randomized complete block design*).

Es un diseño en bloques al azar con cuatro bloques (cuatro experimentos independientes) y un factor de interés que es el número de pasadas con 4 niveles (0, 30, 45, 60) correspondiente a 4 tiempos (Tiempo 0, 2 h 11 min, 3 h 16 min, 4 h 22 min) respectivamente. Dentro de cada bloque se aplicaron aleatoriamente los 4 niveles del factor con duplicados para asegurar la confiabilidad y validez de los resultados (American Public Health Association, 2017), para un total de 8 unidades experimentales por bloque y 32 en total.

Este diseño bloquea la posible fuente de variación dada por las diferentes concentraciones iniciales en los dos experimentos, evaluando todos los niveles del factor dentro de cada bloque (Montgomery, 2005).

4.5 Pruebas de acuerdo con el diseño experimental elegido y análisis microbiológico.

4.5.1 Pruebas experimentales

De acuerdo con el diseño experimental previamente establecido, se llevaron a cabo las pruebas para evaluar la eficiencia del reactor de cavitación hidrodinámica rotativa en la reducción

VIABILIDAD DE LA CAVITACIÓN EN TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

bacteriana. En cada uno de los experimentos, se realizaron mediciones en los puntos de muestreo correspondientes a 0, 30, 45 y 60 pasadas. En este caso las muestras recolectadas tenían un codificado (E1-Np0-R1) siendo, E: Número de experimento, Np=Número de pasadas, R: Número de réplica. Estas pruebas incluyeron la preparación y tratamiento de una solución simulada de agua contaminada con *E. coli*. Además del análisis microbiológico, se midieron otros parámetros críticos para comprender mejor las condiciones de operación del reactor y su influencia en el proceso de cavitación:

pH: Se midió el pH del agua antes y después de cada conjunto de pasadas usando el MEDIDOR DE SOBREMESA PH, ORP, °C, EC, TDS Y NAACL HI 2550, HANNA® para monitorear cualquier cambio en la acidez o alcalinidad que pudiera afectar la actividad bacteriana o el funcionamiento del reactor.

Corriente Eléctrica del Motor: Se registró la corriente eléctrica consumida por el motor durante el funcionamiento del reactor con ayuda de un PINZA AMPERIMÉTRICA UNI-TREND UT200A. Esto permitió evaluar la estabilidad operativa y el consumo energético del sistema a medida que se incrementaba el número de pasadas.

Temperatura del Agua: La temperatura del agua se midió en cada punto de muestreo usando un TERMOMETRO DIGITAL. Dado que la cavitación puede generar calor, fue esencial controlar la temperatura para garantizar que no influyera negativamente en la eficiencia de la cavitación o en la integridad de las muestras.

Estas mediciones adicionales proporcionaron una comprensión más completa de las condiciones de operación del reactor y su impacto en el proceso de desinfección. Los datos

VIABILIDAD DE LA CAVITACIÓN EN TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

recopilados fueron analizados para correlacionar las variaciones en pH, corriente eléctrica, y temperatura con la efectividad de la reducción bacteriana observada.

4.5.2 Análisis microbiológico

Para determinar la eficacia del tratamiento se realizaron análisis microbiológicos en cada una de las muestras recolectadas. Las pruebas involucraron la dilución seriada de cada muestra y el cultivo en medios selectivos (chromocult) para el conteo de unidades formadoras de colonias (UFC) (Tal como en la sección 4.3.4). Este proceso permitió cuantificar la concentración de *E. coli* antes y después del tratamiento, facilitando la evaluación de la reducción bacteriana. La concentración de UFC/mL se determinó contando las colonias en la placa, considerando el factor de dilución correspondiente y usando la siguiente ecuación (Brown, 2004):

$$\frac{UFC}{mL} = \frac{\text{Número de colonias contadas}}{\text{Volumen Inoculado (mL)} * \text{Factor de dilución}} \quad (\text{Ec. 10})$$

4.6 Comparación de alternativas de desinfección de aguas mediante una matriz comparativa.

Del análisis de los resultados obtenidos en la etapa anterior se construyó una matriz. Esta matriz servirá para contrastar las técnicas físicas de tratamiento de aguas residuales con la tecnología ARCHR, centrándose especialmente en la eficacia de la cavitación hidrodinámica en relación con un parámetro crucial denominado E_{EO} (Electric Energy Per Order of Reduction). A través de este análisis comparativo, se buscará determinar la viabilidad del proceso de cavitación hidrodinámica en relación con otras tecnologías de desinfección, con el objetivo último de identificar una opción más eficiente y sostenible para la desinfección de aguas.

VIABILIDAD DE LA CAVITACIÓN EN TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

4.6.1 Construir una matriz comparativa de las tecnologías empleadas en la desinfección de aguas residuales.

En esta matriz se tuvieron en cuenta aspectos cruciales que van a hacer que la tecnología de desinfección sea más efectiva. Uno de los principales factores es el tiempo de proceso, ya que influye directamente en la eficiencia operativa. También se consideró la complejidad del proceso, dado que tecnologías más complicadas pueden implicar mayores dificultades en su implementación y operación. La efectividad en la eliminación de contaminantes, los costos de instalación y operación, el impacto ambiental y la eficiencia energética son cruciales para evaluar tecnologías de tratamiento. El parámetro E_{EO} (Electric Energy per Order of Reduction) mide la eficiencia energética, y un E_{EO} bajo indica una tecnología más eficiente y con menores costos operativos, haciéndola más viable para su implementación.

5. Resultados y análisis

Se ejecutaron con éxito todas las pruebas experimentales, siguiendo rigurosamente los procedimientos establecidos. Los experimentos fueron diseñados para evaluar la eficiencia del proceso en la reducción de *Escherichia coli* en agua simulada, midiendo la concentración bacteriana a diferentes niveles de recirculación del fluido (número de pasadas). Además, se monitorearon parámetros adicionales como el pH, la corriente eléctrica consumida por el motor del reactor y la temperatura del agua durante el proceso. Estos parámetros proporcionan una visión integral de cómo el proceso de cavitación afecta tanto la calidad microbiológica del agua como las condiciones operativas del sistema. La tabla completa con todos los datos recolectados se encuentra en la Figura 10 (Ver Apéndice E). Dado su gran tamaño, no se incluye en el cuerpo principal del informe. Sin embargo, todos los análisis y conclusiones presentados en este proyecto se basan en los datos recopilados que se detallan en dicha tabla.

5.1 Resultados de las pruebas experimentales exploratorias.

La primera prueba tuvo un tiempo de 30 minutos con el fin de observar el funcionamiento del equipo y tras este tiempo de operación (6 pasadas por el reactor de cavitación), se tomó una muestra para el conteo de colonias bacterianas.

La concentración bacteriana medida después de 30 minutos **no mostró una reducción significativa** en comparación con la muestra inicial. Esto sugirió que este tiempo continuo de operación podría no ser el tiempo más efectivo para la desinfección en este contexto.

Debido a los resultados insatisfactorios obtenidos con la prueba de 30 minutos, se revisó con más detalle la literatura y se determinó evaluar el número de pasadas como la variable independiente principal. La idea fue probar incrementos en el número de pasadas para identificar

VIABILIDAD DE LA CAVITACIÓN EN TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

una correlación más clara entre la desinfección y la cavitación. En particular, se evaluaron diferentes números de pasadas (30 y 60) en pruebas independientes para evitar la interferencia entre experimentos y observar su efecto sobre la reducción bacteriana

Las pruebas exploratorias mostraron una clara tendencia de reducción en la concentración bacteriana con el aumento en el número de pasadas (Ver Tabla 2). La reducción logarítmica, calculada con la Ec. 11 (Bolton et al., 2001) mostró una disminución significativa con un mayor número de pasadas.

$$\log_{10}\left(\frac{c}{c_0}\right) \quad (\text{Ec.11})$$

Tabla 2.

Resultados Reducción logarítmica pruebas exploratorias

Número de Pasadas	Reducción logarítmica
30	1
60	4

La reducción bacteriana aumenta significativamente con un mayor número de pasadas, destacando la importancia de la cavitación prolongada para maximizar la desinfección. Estos hallazgos justificaron el diseño del experimento principal, donde se evaluaron los niveles de 30, 45 y 60 pasadas en un contexto controlado para obtener datos más robustos y concluyentes sobre el desempeño del reactor de cavitación.

VIABILIDAD DE LA CAVITACIÓN EN TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

5.2 Resultados de las pruebas experimentales basadas en el diseño experimental.

En la Tabla 3 se observa la concentración bacteriana en UFC/mL en función del número de pasadas y en la Tabla 4 la reducción bacteriana calculada (Ec. 11) en cada uno de los experimentos independientes con cada una de sus réplicas y la reducción logarítmica promedio.

Tabla 3

Resultados de la concentración de Escherichia Coli en cada uno de los niveles del número de pasadas por el reactor de Cavitación.

Concentración [UFC/mL]								
Np	EXP1		EXP2		EXP3		EXP4	
	R1	R2	R1	R2	R1	R2	R1	R2
0	1,67x10 ¹⁰	5,33x10 ¹¹	3,33x10 ¹⁰	1,67x10 ¹⁰	4,17x10 ¹⁰	8,33x10 ⁸	8,33x10 ⁷	1,67x10 ⁸
30	1,00x10 ⁸	4,17x10 ⁷	4,17x10 ⁹	1,67x10 ⁹	2,50x10 ⁵	8,33x10 ⁶	8,33x10 ⁷	8,33x10 ⁶
45	1,67x10 ⁶	8,33x10 ⁵	2,50x10 ⁹	2,50x10 ⁹	5,83x10 ⁴	2,50x10 ⁵	1,67x10 ⁷	1,67x10 ⁷
60	8,33x10 ⁵	8,33x10 ⁵	3,33x10 ⁸	8,33x10 ⁸	8,33x10 ³	1,67x10 ³	2,50x10 ⁷	1,67x10 ⁶

Tabla 4

Resultados Reducción logarítmica en cada uno de los niveles del número de pasadas por el reactor de Cavitación.

Número de pasadas	Reducción logarítmica								Media
	EXP1		EXP2		EXP3		EXP4		
	R1	R2	R1	R2	R1	R2	R1	R2	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
30	2	4	1	1	5	2	0	1	2
45	4	6	1	1	6	4	1	1	3
60	4	6	2	1	7	6	1	2	3

A partir de los datos obtenidos en las tablas 3 y 4 se observa una disminución significativa en la concentración de *E. Coli* a medida que aumenta el número de pasadas. La concentración

VIABILIDAD DE LA CAVITACIÓN EN TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

inicial (0 pasadas) varía significativamente entre experimentos, pero se observa una reducción consistente con el aumento del número de pasadas. Estos resultados indican que el reactor de cavitación es más efectivo con 45 y 60 pasadas, alcanzando la reducción logarítmica de 3 log, mientras que 30 pasadas logran una reducción de 2 log, que es menos efectiva en comparación.

Según las **guías para la calidad del agua de consumo humano** de la OMS especifican que las medidas de tratamiento del agua deben lograr una reducción significativa (**3 log reduction** (99.9%)) en la concentración de patógenos para asegurar la calidad microbiológica (OMS, 2017), por consiguiente, con 45 y 60 pasadas logrando una reducción de 3 log, el reactor de cavitación cumple con las metas de desempeño de la OMS, que requieren al menos una reducción de 3 log para patógenos en el agua de consumo, mientras que la reducción de 2 log observada en 30 pasadas sugiere que, aunque hay una disminución significativa, no alcanza el estándar de 3 log, indicando que puede no ser suficiente para todos los escenarios de calidad de agua, especialmente en presencia de niveles altos de contaminación bacteriana.

5. 2 Análisis estadístico

Para evaluar la significancia de la reducción bacteriana entre los distintos niveles de pasadas, se realizaron pruebas estadísticas no paramétricas debido a que los datos obtenidos en el experimento presentan desafíos comunes como la posible no normalidad (Se realizaron varias pruebas para verificar la normalidad y lognormalidad de los datos en cada grupo (0, 30, 45, 60) con ayuda del Software [Prism – GraphPad](#) en la Figura 11(Ver Apéndice F) las cuales indicaron "N too small", es decir, que el tamaño de la muestra es demasiado pequeño para realizar las pruebas de manera confiable, por tanto no se pudo determinar de manera concluyente si los datos siguen una distribución normal o lognormal en cada grupo). Por ende, se seleccionó la prueba de **Kruskal-**

VIABILIDAD DE LA CAVITACIÓN EN TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

Wallis y el procedimiento de comparaciones múltiples con el método de **Benjamini, Krieger y Yekutieli** en el software [Prism – GraphPad](#) . A continuación, se presenta un análisis detallado de los resultados obtenidos.

Hipótesis del Estudio

Hipótesis nula (H_0): No existen diferencias significativas en la concentración bacteriana entre los diferentes números de pasadas (0, 30, 45 y 60).

Hipótesis alternativa (H_1): Existen diferencias significativas en la concentración bacteriana entre al menos dos de los diferentes números de pasadas.

Tabla 5

Análisis estadístico Kruskal-Wallis

Test Kruskal-Wallis				
P value	0,0044			
¿Las medianas varían significativamente? ($P < 0,05$)?	Si			
Número de grupos	4			
Número de datos total	32			
Estadística de Kruskal-Wallis (H)	13,09			
Número de comparaciones	6			
Q	0,05			
Procedimiento de aumento lineal en dos etapas de Benjamini, Krieger y Yekutieli	Deferencia rango medio	Diferencia significativa?	q value	Individual P Value
0 vs. 30	9,87	Sí	0,049	0,035
0 vs. 45	13,5	Sí	0,0083	0,004
0 vs. 60	15,6	Sí	0,0036	0,0009
30 vs. 45	3,62	No	0,37	0,44
30 vs. 60	5,75	No	0,23	0,22
45 vs. 60	2,12	No	0,45	0,65

El valor de la estadística (H) de Kruskal-Wallis (13.09) se compara con la distribución chi-cuadrado para determinar si hay diferencias significativas entre los grupos. Para 3 grados de

VIABILIDAD DE LA CAVITACIÓN EN TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

libertad y un nivel de significancia del 0.05, el valor crítico es aproximadamente 7.81 (Benjamini et al., 2006). Como $13.09 > 7.81$, se puede concluir que hay diferencias significativas entre al menos algunos de los niveles de tratamiento en términos de reducción bacteriana.

El método de Benjamini, Krieger y Yekutieli se utilizó para ajustar por las comparaciones múltiples y controlar la tasa de descubrimiento falso (Benjamini et al., 2006). Las comparaciones entre diferentes niveles de pasadas se resumen a continuación, con el **valor p** ajustado (q value) y el **valor p** individual:

Comparaciones Significativas: Las comparaciones 0 vs. 30, 0 vs. 45, y 0 vs. 60 pasadas muestran diferencias significativas en la reducción bacteriana, con valores de q (0.0491, 0.0083, y 0.0036 respectivamente) y p-values individuales menores a 0.05. Esto indica que el aumento en el número de pasadas contribuye significativamente a la reducción de la concentración bacteriana.

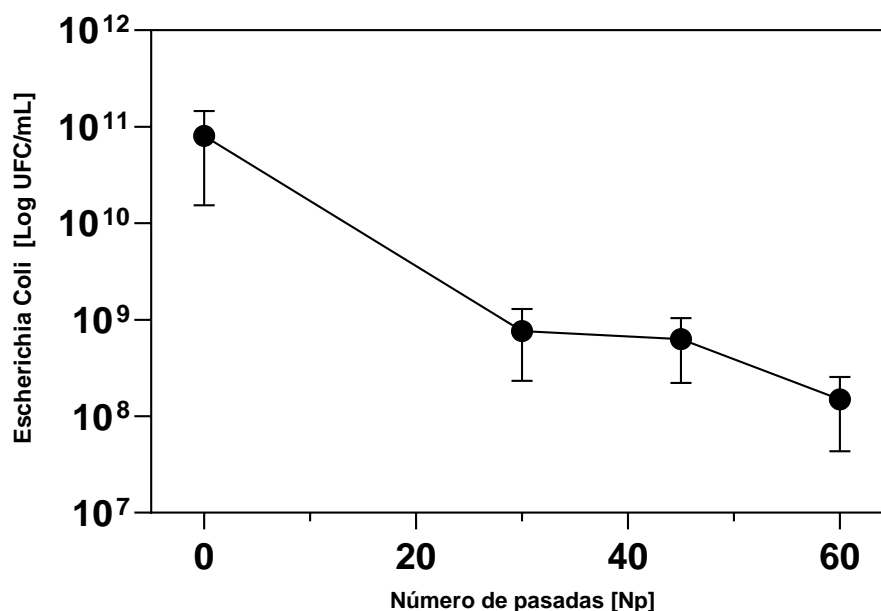
Comparaciones No Significativas: No se observaron diferencias significativas entre 30 vs. 45, 30 vs. 60, y 45 vs. 60 pasadas. Esto sugiere que las reducciones bacterianas entre estas etapas no varían significativamente.

Este análisis proporciona una base sólida para entender el impacto del número de pasadas en el proceso de desinfección, respaldando la eficacia de la cavitación en la reducción de la carga bacteriana a medida que se incrementa el número de pasadas, esto se puede evidenciar gráficamente a continuación:

Figura 5

Concentración de Escherichia Coli [UFC/mL] Vs Número de pasadas por el reactor de cavitación.

VIABILIDAD DE LA CAVITACIÓN EN TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES



La figura 5 muestra la relación entre la concentración de E. Coli (en unidades logarítmicas UFC/mL) y el número de pasadas a través del reactor de cavitación (N_p).

Inicialmente, sin pasar por el reactor ($N_p = 0$), la concentración bacteriana es de aproximadamente 1×10^{11} UFC/mL. Después de 30 pasadas, la concentración se reduce significativamente a alrededor de 1×10^9 UFC/mL, lo que representa una reducción logarítmica de aproximadamente 4 unidades. Al aumentar el número de pasadas a 45, la concentración bacteriana disminuye ligeramente en comparación con 30 pasadas. Finalmente, con 60 pasadas, se alcanza la concentración más baja de aproximadamente 1×10^8 UFC/mL. La forma de la curva sugiere que la mayor parte de la reducción bacteriana ocurre entre 0 y 30 pasadas, y posteriores incrementos en el número de pasadas tienen un efecto menor en la reducción adicional de la concentración. Las barras de error asociadas a cada punto de datos reflejan la variabilidad inherente a las mediciones experimentales, sugiriendo un rango de confianza en torno a los valores obtenidos. Este patrón sugiere que el proceso de cavitación ejerce un efecto reductor sobre la carga

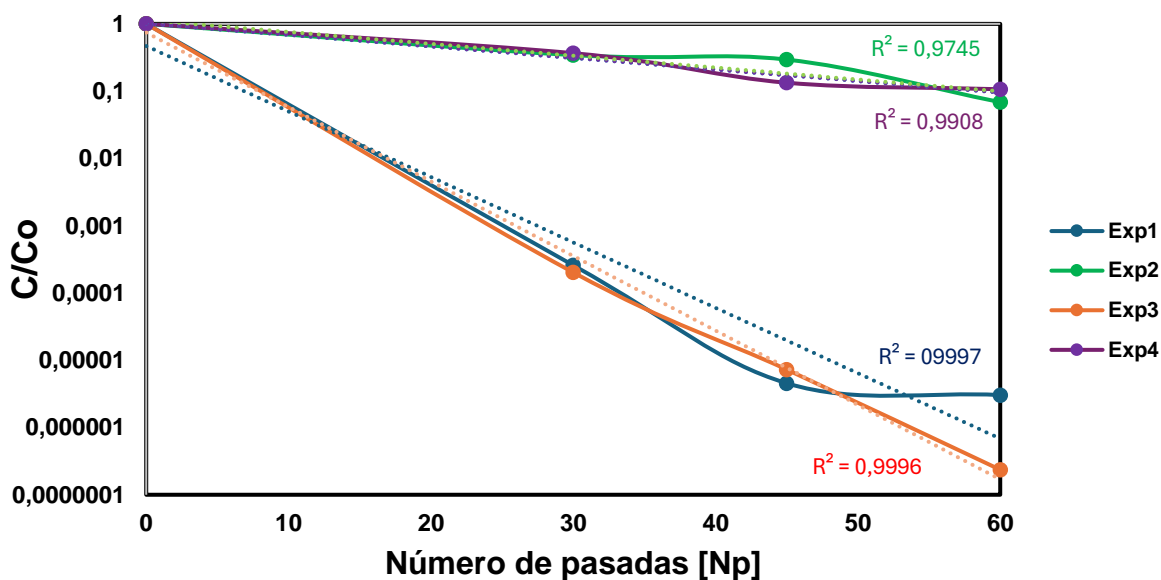
VIABILIDAD DE LA CAVITACIÓN EN TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

microbiana, lo cual es consistente con los principios teóricos de la cavitación como método de desinfección y con el análisis estadístico.

Ahora bien, la siguiente figura presenta la relación entre la concentración bacteriana normalizada C/C_0 y el número de pasadas (Np) para los cuatro experimentos independientes (Exp 1,2,3,4). Se ajustaron curvas exponenciales para evaluar el comportamiento de la reducción bacteriana con respecto a las pasadas, con un enfoque en identificar la efectividad de la cavitación a diferentes niveles de tratamiento.

Figura 6

Interacción de C/C_0 Vs Número de Pasadas por el reactor de cavitación



Esta normalización permite visualizar y comparar fácilmente la cinética de reducción bacteriana en los diferentes experimentos, ya que todos se presentan en una escala relativa común (C/C_0). Un valor de $C/C_0 < 1$ indica una reducción en la concentración bacteriana. A medida que este valor disminuye, la eficacia del tratamiento aumenta.

VIABILIDAD DE LA CAVITACIÓN EN TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

La reducción bacteriana con respecto al número de pasadas sigue un modelo exponencial decreciente. Esto se justifica porque los procesos de desinfección y reducción bacteriana suelen seguir patrones exponenciales, donde la cantidad de organismos disminuye a una tasa proporcional a su número presente (Lazarova et al., 1998). Las curvas ajustadas en la gráfica muestran una tendencia decreciente con buen ajuste a un modelo exponencial (valores de R^2 muy cercanos a 1 para algunas curvas), indicando una alta correlación entre los datos experimentales y el modelo teórico.

Las primeras pasadas (hasta 30) muestran una reducción significativa en la concentración bacteriana, reflejada en una pendiente pronunciada en la gráfica. Esto sugiere que el tratamiento es altamente efectivo en esta fase inicial. A partir de las 30 pasadas, la reducción en la concentración bacteriana se estabiliza, especialmente notable en los experimentos Exp2 y Exp4, donde la curva se aplan. Esto puede indicar un punto de saturación en la eficiencia del tratamiento, donde la reducción adicional de bacterias es marginal.

Los experimentos Exp1 y Exp3 muestran una mayor eficacia (reducción más pronunciada y mejor ajuste exponencial) en comparación con Exp2 y Exp4, especialmente en las primeras pasadas. Esta variabilidad puede deberse a diferencias en las condiciones iniciales, como la concentración bacteriana y otros parámetros operativos.

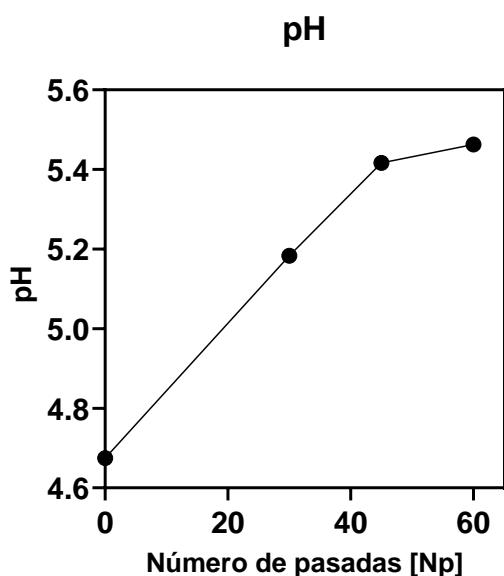
5.3 Análisis de pH, Temperatura y Corriente eléctrica

En las figuras 7,8 y 9 se observan las curvas promedio de los parámetros medidos de pH, Temperatura y corriente eléctrica, seguidas del análisis de estos datos.

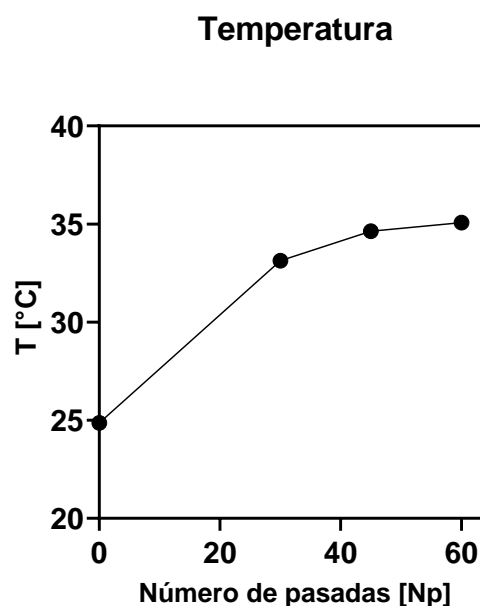
VIABILIDAD DE LA CAVITACIÓN EN TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

Figura 7

Relación pH y el Número de Pasadas por el reactor de cavitación

**Figura 8**

Relación Temperatura y el Número de Pasadas por el reactor de cavitación



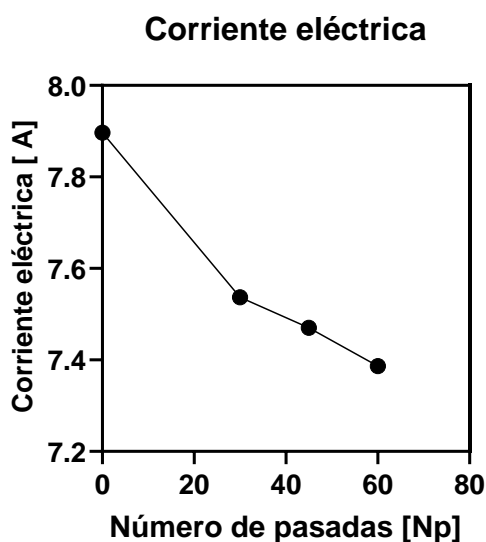
Se observa que el pH aumenta levemente con el incremento en el número de pasadas (de 4.675 en 0 pasadas a 5.4625 en 60 pasadas). Esto sugiere una relación entre la actividad cavitacional y el pH, esto se podría explicar porque a que debido a que la **cavitación** en el reactor produce burbujas de gas que colapsan violentamente, generando puntos de alta temperatura y presión, este proceso conduce a la disociación del agua y la formación de radicales hidroxilos (**OH**) y otros especies reactivas de oxígeno (**ROS**), que son altamente efectivos en la destrucción de microorganismos (Ranade et al., 2022), estos radicales OH pueden neutralizar ácidos presentes en el agua, aumentando el pH. Sin embargo el cambio en pH es relativamente pequeño, y es esencial controlarlo, ya que puede influir en la actividad de desinfección y la estabilidad de las especies químicas formadas.

VIABILIDAD DE LA CAVITACIÓN EN TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

En cuanto al incremento en la temperatura con el número de pasadas puede ser atribuido al efecto del trabajo mecánico y la fricción generada por el sistema de cavitación. La energía cinética del fluido se convierte en calor debido a las colisiones entre las moléculas de agua y la fricción contra las paredes de la tubería. Sin embargo este efecto térmico puede influir negativamente en la eficiencia del proceso después de cierto punto, al reducir la efectividad del colapso de burbujas, por ende se debe controlar este parámetro durante todo el proceso.

Figura 9

Relación de la corriente eléctrica y el Número de Pasadas por el reactor de cavitación



La corriente eléctrica disminuye a medida que aumenta el número de pasadas, lo cual podría estar relacionado con la tasa de degradación específica. En procesos de cavitación, esta tasa está vinculada a la eficiencia en la formación y colapso de burbujas. A medida que el fluido se calienta y su viscosidad disminuye, las burbujas pueden formarse y colapsarse con menor resistencia. Esto podría afectar la tasa de degradación de contaminantes y microorganismos, así como reducir la resistencia al flujo (Šarc et al., 2018). En consecuencia, se requiere menos esfuerzo

VIABILIDAD DE LA CAVITACIÓN EN TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

por parte del motor para mantener el movimiento del fluido. Este comportamiento sugiere que la eficiencia energética del sistema mejora a medida que el proceso de cavitación se estabiliza.

4.6.2 Matriz comparativa de tecnologías de desinfección para el tratamiento de aguas residuales.

La matriz comparativa evalúa diversas tecnologías de desinfección de agua según varios aspectos clave: Principio, Aplicación Principal, Tiempo de Proceso, Eficacia, Impacto Ambiental, Facilidad de Operación, Requisitos de Recursos, Costos de Implementación, Operación y Mantenimiento, E_{EO} (Electric Energy per Order of Reduction) y Porcentaje de Desinfección. La efectividad en la eliminación de contaminantes es crucial para el éxito del tratamiento. Los costos de instalación, operación y mantenimiento, junto con los recursos necesarios, impactan significativamente en la viabilidad económica. Un criterio crítico es el impacto ambiental, favoreciendo tecnologías sostenibles a largo plazo. El E_{EO} evalúa la eficiencia energética; un valor bajo indica mayor eficiencia y menores costos operativos, haciendo la tecnología más atractiva para su implementación. A continuación, se presenta la matriz comparativa de las tecnologías de desinfección de aguas residuales.

Tabla 6

Matriz comparativa de tecnologías de desinfección para el tratamiento de aguas residuales

VIABILIDAD DE LA CAVITACIÓN EN TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

Matriz comparativa de tecnologías de desinfección para el tratamiento de aguas residuales

Tecnología	Principio	Aplicación Principal	Tiempo de Proceso	Eficacia	Impacto Ambiental	Facilidad de Operación	Requisitos Recursos	Costo	EEO (Electric Energy per Order of Reduction)	Porcentaje de Desinfección	Referencias
Cavitación Hidrodinámica Rotativa	Uso de microburbujas generadas por cavitación para desinfectar	Eliminación de microorganismos y posibles compuestos orgánicos	Moderado, en horas	Alta, efectiva contra bacterias, virus y protozoos.	No genera residuos y subproductos peligrosos	Requiere mantenimiento de los sistemas de cavitación	Equipos de cavitación y sistemas de control de flujo	Moderado a bajo, equipos especializados y operación continua.	0.04 - 9.33 kWh/m³	99 - 99.9%	(Darandale et al., 2023) (Benites-Alfaro et al., 2022) (Šarc et al., 2018)
Desinfección UV	Radiación UV daña el ADN/RNA de microorganismos	Desinfección final en plantas de tratamiento de aguas residuales	Rápido, en minutos	Muy alta, puede inactivar los microorganismos presentes en el agua.	No genera residuos peligrosos	Fácil de operar pero requiere mantenimiento de lámparas	Lámparas de vapor de mercurio, reactores y balastos electrónicos.	Moderado, varía según el fabricante	0.6 - 0.21 kWh/m³	99 - 99.99%	(Litter, 2022) (EPA, 1999) (Andrés & Fiderman, 2019c)
Filtración por Membrana (MF/UF)	Membranas retienen microorganismos y partículas finas	Pretratamiento para desinfección y mejora de calidad del agua	Moderado, depende de la presión y el flujo	Alta, reducción de la concentración de bacterias y virus de 4 a 8 logaritmos	No genera subproductos químicos pero puede requerir gestión de residuos sólidos	Moderada, requiere limpieza y reemplazo de membranas	Membranas y sistemas de bombeo	Alto, alto costo inicial y mantenimiento de membranas	0 - 1 kWh/m³	98 - 99%	(Bernal Romero, 2012) (Rubio Clemente et al., 2013) (Rivera Mejía, 2014) (Vásquez Rodríguez, 2018)
Osmosis inversa	Membranas filtran microorganismos y partículas pequeñas	Tratamiento para desinfección y desalación del agua.	Moderado, Depende de la presión y el flujo	Alta, la membrana puede remover virus, bacterias, parásitos y materia orgánica e inorgánica	Si genera subproductos que pueden ser tóxicos	Moderada, requiere limpieza y reemplazo de membranas	Membranas y sistemas de bombeo	Alto, costo de inversión y operación.	3.7 - 8 kWh/m³	95 - 99 %	(Leal, s. f.) (EPA, 1998) (Pilato Colomar, 2021) (Zerpa & Martín, 2022)
Electrocoagulación	Neutralización de cargas eléctricas de partículas coloidales con coagulantes	Tratamiento de remoción de contaminantes y metales.	Moderado, depende del caudal y corriente eléctrica	Alta, eficaz en la eliminación de bacterias, virus y patógenos.	Si, puede generar metales pesados	Moderada, se puede presentar corrosión	Reactor tipo Batch o continuo y electrodos de aluminio y hierro.	Moderado, depende del tipo de material del electrodo y consumo energético	2.54 kWh/m³	90 - 99%	(Bayramoglu et al., 2004) (Páez et al., 2005) (García-Orozco et al., 2021) (Ruiz & Giraldo, 2007)

VIABILIDAD DE LA CAVITACIÓN EN TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

Las tecnologías comparadas en esta matriz son aquellas que compiten con la cavitación hidrodinámica en la desinfección de aguas residuales. La cavitación hidrodinámica rotativa es muy eficaz contra bacterias, virus y protozoos, con un bajo impacto ambiental y una eficacia de desinfección del 99 al 99.9%, aunque requiere mantenimiento especializado. La desinfección UV es rápida y eficaz sin generar residuos, pero requiere mantenimiento regular de las lámparas y tiene un consumo energético de 0.6 a 21 kWh/m³.

La filtración por membrana (MF/UF) mejora la calidad del agua reteniendo microorganismos y partículas finas, con un impacto ambiental moderado, aunque presenta altos costos iniciales y de mantenimiento y un consumo energético de 0 a 1 kWh/m³, con una eficacia del 98 al 99%. La ósmosis inversa es altamente eficaz pero costosa y consume mucha energía, con un consumo de 3.7 a 8 kWh/m³ y una eficacia del 95 al 99%.

La electrocoagulación elimina contaminantes neutralizando cargas eléctricas, con un impacto ambiental moderado, un consumo de 2.54 kWh/m³ y una eficacia del 90 al 99%. En resumen, la cavitación hidrodinámica rotativa se destaca como una opción prometedora, equilibrando eficacia, costos y sostenibilidad frente a otras tecnologías evaluadas.

4.6.2 Resultados y Análisis de EEO (Electric Energy per Order of Reduction)

En términos de viabilidad técnica, el parámetro E_{EO}, según (Bolton et al., 2001), expresa la cantidad de energía eléctrica necesaria para reducir el número de bacterias. El valor de E_{EO} está dado en kWh/m³ y se puede calcular utilizando la siguiente fórmula (EC.12):

$$E_{EO} = \frac{P}{Q * LOG_{10} CFU} \quad (Ec.12)$$

VIABILIDAD DE LA CAVITACIÓN EN TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

En esta ecuación, P representa la potencia eléctrica de la bomba en kilovatios [kW], Q es el caudal medido en metros cúbicos por hora [m³/h], y la reducción logarítmica se expresa en unidades formadoras de colonias [UFC/mL]. Para calcular la potencia eléctrica, se necesita conocer el voltaje [V] y el factor de potencia [FP] del motor, los cuales están especificados en el propio motor (ver anexos); en este caso corresponden a 110 V y 0,95 respectivamente. Estos datos se multiplican por la corriente eléctrica [A] y por último se debe realizar una conversión de Watts a Kilowatts.

Tabla 7

Resultados del parámetro E_{EO} (Electric Energy per Order of Reduction) a 60 pasadas por el reactor de Cavitación hidrodinámica rotacional avanzado.

60 pasadas					
	Log10 [UFC/mL]	Corriente eléctrica [A]	Q [L/S]	P [KW]	E_{EO} [KWh/m ³]
EXP 1	2,08	7,35	0,096	0,77	3,84
EXP 2	1,63	7,48	0,096	0,78	4,98
EXP 3	6,63	6,93	0,096	0,72	1,14
EXP 4	0,97	7,75	0,096	0,81	8,66

Según los resultados obtenidos, el parámetro E_{EO} . Para la cavitación hidrodinámica rotativa varía entre (1,14 – 8,66) KWh/m³. Aunque este valor es superior al de las otras tecnologías, la cavitación hidrodinámica sigue siendo viable al considerar otros aspectos claves. Además, su eficiencia energética puede mejorarse aumentando el número de pasadas en el proceso. Según (Šarc et al., 2018), la eficiencia energética de la cavitación estática oscila entre (6,94 – 20,83) KWh/m³, lo que hace que la cavitación hidrodinámica sea más atractiva en comparación.

6. Conclusiones

La tecnología de cavitación ha sido evaluada exitosamente y ha demostrado ser un método efectivo para la desinfección de aguas residuales. Los experimentos mostraron que el proceso logra una reducción logarítmica de 2 para 20 pasadas y de 3 para 45 y 60 pasadas. Esto indica que el método de cavitación puede alcanzar niveles de desinfección que cumplen con las guías de calidad del agua de la OMS para la desinfección, proporcionando una solución viable y eficiente para el tratamiento de aguas residuales sin la necesidad de aditivos químicos.

La principal variable operativa que influyen en la eficiencia del proceso de cavitación es el número de pasadas. Los resultados indicaron que un mayor número de pasadas aumenta la eficacia de la desinfección hasta un punto de estabilización, alcanzado alrededor de 45 pasadas. La temperatura, pH y la corriente eléctrica, aunque influyen en la operación del sistema, no mostraron un efecto lineal directo sobre la eficiencia de la desinfección.

El diseño experimental y el análisis estadístico confirmaron que la variable número de pasadas tiene un impacto estadísticamente significativo en la reducción bacteriana, validando la importancia de ajustar esta variable para optimizar el proceso. Esto proporciona una base sólida para futuras aplicaciones y optimizaciones de la tecnología en la desinfección de aguas residuales.

Comparando la cavitación hidrodinámica con otras tecnologías utilizando el parámetro E_{EO} a 60 pasadas, evidenció que la cavitación hidrodinámica, a pesar de presentar valores más altos en este parámetro en comparación con algunas tecnologías, la cavitación hidrodinámica destaca por su costo competitivo, facilidad de operación y la ausencia de generación de residuos tóxicos. Estos aspectos la posicionan como una alternativa atractiva y viable para aplicaciones industriales de tratamiento de aguas residuales.

7. Recomendaciones

Basado en los resultados obtenidos y el análisis realizado, se presentan las siguientes recomendaciones para trabajos futuros y mejoras en el proyecto:

- Realizar pruebas experimentales utilizando aguas residuales reales en lugar de agua simulada. Esto permitiría evaluar el desempeño del reactor de cavitación en condiciones más cercanas a la aplicación práctica y validar su efectividad con la complejidad y variabilidad de las aguas residuales reales.
- Incorporar la medición de parámetros fisicoquímicos adicionales durante los experimentos, como, turbidez, demanda química de oxígeno (DQO), DBO₅, entre otros. Esto brindaría información valiosa sobre los cambios en las características del agua después del tratamiento con cavitación y ayudaría a comprender mejor los mecanismos involucrados en la desinfección y la degradación de contaminantes.
- Evaluar el impacto del caudal del reactor de cavitación. Un mayor caudal podría permitir alcanzar el mismo número de pasadas (por ejemplo, 45 pasadas) en un tiempo más corto, lo que reduciría el tiempo de tratamiento y, en consecuencia, el consumo de energía. Sin embargo, sería necesario estudiar el impacto de un mayor caudal en la eficiencia de la cavitación y la desinfección para asegurar que no se comprometa la efectividad del proceso.
- Realizar experimentos adicionales evaluando un rango más amplio de números de pasadas, especialmente por encima de 60 pasadas. Aunque los resultados actuales muestran una tendencia de reducciones marginales en la concentración bacteriana después de 60 pasadas, podría ser valioso explorar si al aumentar significativamente el número de pasadas se logran reducciones adicionales sustanciales.

Referencias Bibliográficas

ACIV. (s. f.). AC Ingeniería Virtual Industria 4.0. <https://www.acingenieriavirtual.com>

American Public Health Association. (2017). *Standard methods for the examination of water and wastewater* (E. W. Rice, R. B. Baird, & A. D. Eaton, Eds.; 23^a ed.). American Water Works Association.

Anasori Movahed, S., Calgaro, L., & Marcomini, A. (2023). Trends and characteristics of employing cavitation technology for water and wastewater treatment with a focus on hydrodynamic and ultrasonic cavitation over the past two decades: A Scientometric analysis. *The Science of the Total Environment*, 858(159802), 159802. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.159802>

Arrojo, S., Benito, Y., & Martínez Tarifa, A. (2008). A parametrical study of disinfection with hydrodynamic cavitation. *Ultrasonics Sonochemistry*, 15(5), 903–908. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2007.11.001>

Bayramoglu, M., Kobya, M., Can, O. T., & Sozbir, M. (2004). Operating cost analysis of electrocoagulation of textile dye wastewater. *Separation and Purification Technology*, 37(2), 117–125. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2003.09.002>

Benites-Alfaro, E., López, A. O., Pereyra, M. R., & Olivera, C. C. (2022). Energy efficiency in bacterial treatment of wastewater by hydrodynamic cavitation. *Chemical engineering transactions*. <https://doi.org/10.3303/CET2296035>

Benjamini, Y., Krieger, A. M., & Yekutieli, D. (2006). Adaptive linear step-up procedures that control the false discovery rate. *Biometrika*, 93(3), 491–507. <https://doi.org/10.1093/biomet/93.3.491>

Bernal Romero, del H. B. M. de L. Á. (2012). *Tratamiento de aguas residuales con membrana para obtener efluentes de alta calidad: Estudio a edad de lodo de 30 días*. Iuaca.ua.es. <https://iuaca.ua.es/es/master-agua/documentos/gestadm/trabajos-fin-de-master/tfm06/tfm-mari-angeles-bernal-romero.pdf>

Blanco-Corredor, A. F., Bustos-López, M. C., & Arrieta-Loyo, G. (2021). Gestión de aguas residuales: Un estudio de caso en los municipios de Puerto Wilches y Yondó - Colombia. *Gestión y ambiente*, 24(2), 92749. <https://doi.org/10.15446/ga.v24n2.92749>

Bolton, J. R., Bircher, K. G., Tumas, W., & Tolman, C. A. (2001). Figures-of-merit for the technical development and application of advanced oxidation technologies for both electric- and solar-driven systems (IUPAC Technical Report). *Pure and Applied Chemistry*, 73(4), 627–637. <https://doi.org/10.1351/pac200173040627>

VIABILIDAD DE LA CAVITACIÓN EN TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

- Brown, A. E. (2004). *Microbiological applications: Short version: A laboratory manual in general microbiology* (9^a ed.). McGraw Hill Higher Education.
- Burzio, E., Bersani, F., Caridi, G. C. A., Vesipa, R., Ridolfi, L., & Manes, C. (2020). Water disinfection by orifice-induced hydrodynamic cavitation. *Ultrasonics Sonochemistry*, *60*(104740), 104740. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2019.104740>
- CITME. (2006). *Tratamientos avanzados de aguas residuales industriales*. Madrid.org. <https://www.madrid.org/bvirtual/BVCM001696.pdf>
- Darandale, G. R., Jadhav, M. V., Warade, A. R., & Hakke, V. S. (2023). Hydrodynamic cavitation a novel approach in wastewater treatment: A review. *Materials Today: Proceedings*, *77*, 960–968. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.12.075>
- Dular, M., Griessler-Bulc, T., Gutierrez-Aguirre, I., Heath, E., Kosjek, T., Krivograd Klemenčič, A., Oder, M., Petkovšek, M., Rački, N., Ravnikar, M., Šarc, A., Širok, B., Zupanc, M., Žitnik, M., & Kompare, B. (2016). Use of hydrodynamic cavitation in (waste)water treatment. *Ultrasonics Sonochemistry*, *29*, 577–588. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2015.10.010>
- EPA. (1998). *Small System Compliance Technology List for the Non-Microbial Contaminants Regulated Before 1996*. Epa.gov. https://archive.epa.gov/water/archive/web/pdf/2001_01_12_standard_tlstnm.pdf
- EPA. (1999). *Folleto informativo de tecnología de aguas residuales. Desinfección con ozono*. Epa.gov. <https://19january2017snapshot.epa.gov/sites/production/files/2015-06/documents/cs-99-063.pdf>
- Garay, M. M. B. (2016). *Tratamiento de aguas residuales: Técnicas convencionales*. <http://142.93.18.15:8080/jspui/handle/123456789/68>
- García Garay, J. G. (2019). *Tratamiento piloto para la inviabilización en puerto de especies invasoras del agua de lastre*. Handle.net. <http://hdl.handle.net/20.500.12010/7475>
- García-Orozco, V. M., Roa-Morales, G., Linares-Hernández, I., Serrano-Jimenes, I. J., Salgado-Catarino, M. A., & Natividad, R. (2021). Electrocoagulation of a chocolate industry wastewater in a Downflow column electrochemical reactor. *Journal of Water Process Engineering*, *42*(102057), 102057. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2021.102057>
- GraphPad. (2024). Graphpad.com. <https://www.graphpad.com>
- Gutiérrez-Mosquera, L. F., Arias-Giraldo, S., & Cardona-Naranjo, D. F. (2019). Hydrodynamic Cavitation: Engineering and Agribusiness Approach. *Scientia et Technica*, *24*(2), 283–304. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=84961237015>

VIABILIDAD DE LA CAVITACIÓN EN TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

- Instituto de Hidrología, M. y. E. A. (2022). *ESTUDIO NACIONAL DEL AGUA 2022- IDEAM*. Gov.co. http://www.ideam.gov.co/web/agua/estudio-nacional-del-agua/-/document_library_display/hWSQik0LFPPrw/view/125666586?_110_INSTANCE_hWSQik0LFPPrw_redirect=http%3A%2F%2Fwww.ideam.gov.co%2Fweb%2Fagua%2Festudio-nacional-del-agua%3Fp_p_id%3D110_INSTANCE_hWSQik0LFPPrw%26p_p_lifecycle%3D0%26p_p_state%3Dnormal%26p_p_mode%3Dview%26p_p_col_id%3Dcolumn-1%26p_p_col_pos%3D1%26p_p_col_count%3D2
- Jyoti, K. K., & Pandit, A. B. (2001). Water disinfection by acoustic and hydrodynamic cavitation. *Biochemical Engineering Journal*, 7(3), 201–212. [https://doi.org/10.1016/s1369-703x\(00\)00128-5](https://doi.org/10.1016/s1369-703x(00)00128-5)
- Lafuente Flores, E. F., & López Cevallos, H. A. (2018). Desinfección bacteriana de aguas residuales utilizando cavitación hidrodinámica a través de un tubo Venturi. *Congreso de Ciencia y Tecnología ESPE*, 13(1). <https://doi.org/10.24133/cctespe.v13i1.808>
- Lazarova, V., Janex, M. L., Fiksdal, L., Oberg, C., Barcina, I., & Pommepuy, M. (1998). Advanced wastewater disinfection technologies: short and long term efficiency. *Water Science and Technology: A Journal of the International Association on Water Pollution Research*, 38(12), 109–117. <https://doi.org/10.2166/wst.1998.0516>
- Leal, M. T. (s. f.). *Tecnologías convencionales de tratamiento de agua y sus limitaciones*. Psa.es. https://www.psa.es/es/unidades/tsa/projects/solarsafewater/documents/libro/04_Capitulo_04.pdf
- Litter, M. I. (2022). Últimos avances en tecnologías de base fotoquímica aplicadas a eliminación de contaminantes en agua. *Litter, Marta Irene; Últimos avances en tecnologías de base fotoquímica aplicadas a eliminación de contaminantes en agua; Asociación Química Argentina; Industria y Química*, 371, 1. <https://ri.conicet.gov.ar/handle/11336/204636>
- Mane, M. B., Bhandari, V. M., Balapure, K., & Ranade, V. V. (2020). A novel hybrid cavitation process for enhancing and altering rate of disinfection by use of natural oils derived from plants. *Ultrasonics Sonochemistry*, 61(104820), 104820. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2019.104820>
- Metcalf & Eddy. (1996a). *Ingeniería de Aguas residuales: Tratamiento, vertido y reutilización. Vol 1*. McGraw-Hill, Interamericana de España.
- Metcalf & Eddy. (1996b). *Ingeniería de Aguas Residuales: Tratamiento, vertido y reutilización. Vol 2 (3ª ed.)*. McGraw-Hill, Interamericana de España.
- Metcalf, L., & Eddy, H. P. (1977). *Tratamiento y depuración de las aguas residuales*.
- MinAmbiente. (2015a). *Decreto 1076 de 2015*. Gov.co. <https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/06/Decreto-1076-de-2015.pdf>

VIABILIDAD DE LA CAVITACIÓN EN TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

- MinAmbiente. (2015b). *Resolución 631 de 2015*. Gov.co. <https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/11/resolucion-631-de-2015.pdf>
- Mohod, A. V., Teixeira, A. C. S. C., Bagal, M. V., Gogate, P. R., & Giudici, R. (2023). Degradation of organic pollutants from wastewater using hydrodynamic cavitation: A review. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 11(3), 109773. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2023.109773>
- Montgomery, D. C. (2005). *Diseño y análisis de experimentos*. Editorial Limusa S.A. De C.V.
- OMS. (2017). *Guías para la calidad del agua de consumo humano: Cuarta edición que incorpora la primera adenda*. Who.int; World Health Organization. <https://www.who.int/es/publications/i/item/9789241549950>
- Ozonek, J. (2012). *Application of Hydrodynamic Cavitation in Environmental Engineering*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b11825>
- Páez, C. A. J., Giraldo, A. J., & Ocampo, G. T. (2005). *Construcción de un reactor electroquímico para electrocoagulación como método alternativo en la descontaminación de aguas residuales*. *Revista de la Universidad de Caldas*, 25(2), 145-158.
- Pilato Colomar, A. (2021). *Evaluación tecno-económica y ambiental de un sistema de desalinización autónomo alimentado con fuentes de energía renovables híbridas y diseño de una planta de ósmosis inversa con una capacidad de 2.000 m³/día*. 178894. <https://riunet.upv.es/handle/10251/178894>
- Ranade, V. V., Bhandari, V. M., Nagarajan, S., Sarvothaman, V. P., & Simpson, A. T. (2022). *Hydrodynamic cavitation: Devices, design and applications* (V. P. Sarvothaman & A. T. Simpson, Eds.). Blackwell Verlag. <https://doi.org/10.1002/9783527346448>
- Ricardo, L. (2010). TRATAMIENTOS AVANZADOS PARA AGUAS RESIDUALES INDUSTRIALES – UNA REVISIÓN. *Boletín Semillas Ambientales*, 4(2). <https://revistas.udistrital.edu.co/index.php/bsa/article/view/9396>
- Rivera Mejía, F. M. (2014). *WASTEWATER PRETREATMENT WITH MEMBRANES*. Uva.es. <https://uvadoc.uva.es/bitstream/handle/10324/11719/TFM-I-203.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Romero Rojas, J. A. (2004). *Tratamiento de aguas residuales: Teoría y principio de diseño* (3ª ed.). Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. <https://www-digitaliapublishing-com.bibliotecavirtual.uis.edu.co/a/127822>
- Rubio Clemente, A., Chica Arrieta, E. L., & Peñuela Mesa, G. A. (2013). Wastewater treatment processes for the removal of emerging organic pollutants. *Ambiente e Agua - An Interdisciplinary Journal of Applied Science*, 8(3). <https://doi.org/10.4136/ambi-agua.1176>

VIABILIDAD DE LA CAVITACIÓN EN TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

- Ruiz, A. A., & Giraldo, L. F. G. (2007). *Diseño de una celda de electrocoagulación para el Tratamiento de Aguas Residuales de la industria láctea*. Edu.co.
<https://repository.eafit.edu.co/server/api/core/bitstreams/05cb1978-11d3-4c55-b522-bd7542ccbaca/content>
- Šarc, A., Kosel, J., Stopar, D., Oder, M., & Dular, M. (2018). Removal of bacteria Legionella pneumophila, Escherichia coli, and Bacillus subtilis by (super)cavitation. *Ultrasonics Sonochemistry*, 42, 228–236. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2017.11.004>
- Sun, X., Liu, J., Ji, L., Wang, G., Zhao, S., Yoon, J. Y., & Chen, S. (2020). A review on hydrodynamic cavitation disinfection: The current state of knowledge. *The Science of the Total Environment*, 737(139606), 139606. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139606>
- Troconis, A. (2010). *Tratamiento de Aguas Residuales*. Belzona.com.
https://www.belzona.com/es/solution_maps/wastewater/money_map.pdf
- Vásquez Rodríguez, E. D. (2018). *Eliminación de microcontaminantes orgánicos presentes en aguas residuales urbanas mediante MBR combinado con oxidación avanzada y con filtración por membranas*. Rua.ua.es.
https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/80430/1/tesis_edgardo_david_vasquez_rodriguez.pdf
- Wang, B., Su, H., & Zhang, B. (2021). Hydrodynamic cavitation as a promising route for wastewater treatment – A review. *Chemical Engineering Journal (Lausanne, Switzerland: 1996)*, 412(128685), 128685. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.128685>
- Zerpa, F. A. L., & Martín, A. R. (2022). *Desarrollo de una metodología para el estudio de la eficiencia energética en plantas de desalinización por ósmosis inversa de agua de mar*. Ulpgec.es.
<https://accedacris.ulpgc.es/bitstream/10553/127054/1/231ULPGC5.pdf>

Apéndices

Apéndice A. Contaminantes en aguas residuales

Tabla 8

Contaminantes de importancia en aguas residuales.

Contaminantes	Impacto ambiental
Materia orgánica biodegradable	Desoxigenación del agua, generación de olores indeseables
Materia suspendida	Causa turbiedad en el agua, deposita lodos.
Patógenos	Hace el agua insegura para consumo y recreación.
Amoníaco	Desoxigena el agua, es tóxico para organismos acuáticos y puede estimular el crecimiento de algas.
Fósforo	Puede estimular el crecimiento de algas.
Materiales tóxicos	Peligroso para la vida vegetal y animal.
Sales inorgánicas	Limita los usos agrícolas e industriales del agua.
Energía térmica	Reduce la concentración de saturación de oxígeno en el agua, acelera el crecimiento de organismos acuáticos.
Iones hidrógeno	Riesgo potencial para organismos acuáticos.

Nota. Adaptado de (Romero Rojas, 2004).

VIABILIDAD DE LA CAVITACIÓN EN TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

Apéndice B. Tecnologías tratamiento terciario**Tabla 9***Tecnologías utilizadas en el tratamiento terciario o avanzado.*

Tipo de proceso	Descripción del proceso	Tecnologías
Físico	Eliminación de materia orgánica en suspensión mediante procesos mecánicos y aditivos químicos.	Coagulación Floculación Flotación Sedimentación Cavitación Hidrodinámica
Filtración	El agua pasa por un medio poroso que retiene la mayor parte de la materia suspendida.	Filtración granular Micro - pantallas
Membranas de filtración	Impide el paso de contaminantes mayores al diámetro de los poros de una membrana, utilizando la presión transmembrana o el potencial eléctrico transmembrana	Microfiltración Ultrafiltración Nanofiltración Ósmosis Inversa Electrodialisis
Desinfección	Destruye o inactiva microorganismos patógenos.	Radiación Ultravioleta Cloración Ozonización

Nota. Adaptado de (CITME, 2006) (Ricardo, 2010)

VIABILIDAD DE LA CAVITACIÓN EN TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

Apéndice C. Agentes infecciosos presentes en las aguas residuales

Tabla 10

Agentes infecciosos potencialmente presentes en aguas residuales domésticas no tratadas.

Organismo	Enfermedad Causada
Bacterias	
Escherichia coli (enterotoxígeno)	Gastroenteritis
Leptospira (spp.)	Leptospirosis
Salmonella typhi	Fiebre tifoidea
Salmonella (2,100 serotipos)	Salmonelosis
Shigella (4 spp.)	Shigellosis (disentería bacilar)
Vibrio cholerae	Cólera
Protozoos	
Balantidium coli	Balantidiasis
Cryptosporidium parvum	Cryptosporidiasis
Entamoeba histolytica	Amebiasis (disentería amoébrica)
Giardia lamblia	Giardiasis
Helmintos	
Ascaris lumbricoides	Ascariasis
T. solium	Teniasis
Trichuris trichiura	Tricuriasis
Viruses	
Enterovirus (72 tipos; por ejemplo: virus echo y coxsackie del polio)	Gastroenteritis, anomalías del corazón y meningitis.
Hepatitis A	Hepatitis de tipo infeccioso
Agente de Norwalk	Gastroenteritis
Rotavirus	Gastroenreritis

Nota: Adaptado de (Metcalf & Eddy, 1996a) (EPA,1999)

VIABILIDAD DE LA CAVITACIÓN EN TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

Apéndice D. Parámetros fisicoquímicos para vertimientos y reúso de agua.**Tabla 11****Tabla.**

Parámetros fisicoquímicos y sus valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales de aguas residuales domésticas, (ARD) de las actividades industriales, comerciales o de servicios; y de las aguas residuales (ARD y ARND) de los prestadores del servicio público de alcantarillado a cuerpos de aguas superficiales.

PARÁMETRO	UNIDADES	AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS (ARD) DE LAS SOLUCIONES INDIVIDUALES DE SANEAMIENTO DE VIVIENDAS UNIFAMILIARES O BIFAMILIARES	AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS (ARD), Y DE LAS AGUAS RESIDUALES (ARD – ARnD) DE LOS PRESTADORES DEL SERVICIO PÚBLICO DE ALCANTARILLADO A CUERPOS DE AGUAS SUPERFICIALES, CON UNA CARGA MENOR O IGUAL A 625,00 kg/DÍA DBO5
Generales			
pH	Unidades de pH	6,00 a 9,00	6,00 a 9,00
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	mg/L O ₂	200,00	180,00
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO ₅)	mg/L O ₂		90,00
Sólidos Suspendidos Totales (SST)	mg/L	100,00	90,00
Sólidos Sedimentables (SSED)	mg/L	5,00	5,00
Grasas y Aceites	mg/L	20,00	20,00
Sustancias Activas al Azul de Metileno (SAAM)	mg/L		Análisis y Reporte
Hidrocarburos			
Hidrocarburos Totales (HTP)	mg/L		Análisis y Reporte

VIABILIDAD DE LA CAVITACIÓN EN TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

Compuestos de Fósforo

Ortofosfatos (P-PO ₄ ³⁻)	mg/L	Análisis y Reporte
Fosforo Total (P)	mg/L	Análisis y Reporte

Compuestos de Nitrógeno

Nitratos (N-NO ₃ ⁻)	mg/L	Análisis y Reporte
Nitritos (N-NO ₂ ⁻)	mg/L	Análisis y Reporte
Nitrógeno Amoniacal (N-NH ₃)	mg/L	Análisis y Reporte
Nitrógeno Total (N)	mg/L	Análisis y Reporte

Nota: Adaptado de (MinAmbiente, 2015a)

Tabla 12

Criterios de calidad del agua residual para el uso agrícola.

Variable	Unidad de Medida	Valor Límite Máximo Permisible
Conductividad	μS/cm	1.500,0
Fenoles Totales	mg/L	0,2
Hidrocarburos Totales	mg/L	1,0
Cianuro Libre	mg CN ⁻ /L	0,20
Cloruros	mg Cl ⁻ /L	300,0
Fluoruros	mg F ⁻ /L	1,0
Sulfatos	mg SO ₄ ²⁻ /L	500,0
Mercurio	mg Hg/L	0,001
Sodio	mg Na/L	200,0
Antimonio	mg Sb/L	0,1
Cloro Total Residual (con mínimo 30 minutos de contacto)	mg Cl ₂ /L	< 1,0
Nitratos (expresado como N)	mg/L	11,0

Nota: Adaptado de (MinAmbiente, 2015b).

Apéndice E. Resultados datos pruebas experimentales

VIABILIDAD DE LA CAVITACIÓN EN TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

Figura 10

Resultados de pruebas experimentales

Código Muestra	Fecha	Volumen Sistema (V)	Volumen Muestra (Vm)	Tiempo proceso (t)	Número pasadas (np)	Temperatura (Tc)	Corriente Eléctrica (I)	pH	Crecimiento bacteriano en dilución								Título de la dilución	Número de Colonias	Concentración [UFC/mL]	LR		
		[L]	[L]	[s]	-	[°C]	[A]		-	SD	1E-01	1E-02	1E-03	1E-04	1E-05	1E-06	1E-07				1E-08	
-		[L]	[L]	[s]	-	[°C]	[A]	-	SD	1E-01	1E-02	1E-03	1E-04	1E-05	1E-06	1E-07	1E-08			[UFC/mL]		
AS-t0	9/05/2024	7	0,02	0	0	23,4		5,3	SI	SI	SI	SI	SI	NO	NO	NO	NO	1,00E+04				
AS-t30	9/05/2024	6,98	0,02	1800	7	22,6		5,4	SI	SI	SI	SI	SI	NO	NO	NO	NO	1,00E+04				
AR-t0	17/05/2024	7	0,02	0	0	25,3		7,3	SI	SI	SI	SI	SI	SI	NO	NO	NO	1,00E+06	4	3,33E+08		
AR-t0.5	17/05/2024	6,98	0,02	1800	7	31,5		7,8	SI	SI	SI	SI	SI	SI	NO	NO	NO	1,00E+06	3	2,50E+08	0	
AR-t3	17/05/2024	6,96	0,02	7865,17	30	46,8		7,7	SI	SI	SI	SI	SI	SI	NO	NO	NO	1,00E+05	4	3,33E+07	1	
AS-t0	21/05/2024	7	0,02	0	0	26,1	7,75	4,4	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	1,00E+08	3	2,50E+10		
AS-t4.22	21/05/2024	6,98	0,02	15730,3	60	43	7,5	6,2	SI	SI	SI	SI	SI	SI	NO	NO	NO	1,00E+04	2	1,67E+06	4	
E1-Np0-R1	24/05/2024	7	0,02	0	0	24,5	8,24	4,5	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	1,00E+08	2	1,67E+10		
E1-Np0-R2	24/05/2024	6,98	0,02	0	0	24,5	8,24	4,5	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	1,00E+08	64	5,33E+11		
E1-Np30-R1	24/05/2024	6,96	0,02	7865,17	30	35,3	8		SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	1,00E+08	0	1,00E+08	2	
E1-Np30-R2	24/05/2024	6,94	0,02	7865,17	30	35,3	8		SI	SI	SI	SI	SI	NO	NO	NO	NO	1,00E+05	5	4,17E+07	4	
E1-Np45-R1	24/05/2024	6,92	0,02	11797,8	46	40,5	7,65		SI	SI	SI	SI	SI	NO	NO	NO	NO	1,00E+04	2	1,67E+06	4	
E1-Np45-R2	24/05/2024	6,9	0,02	11797,8	46	40,5	7,65		SI	SI	SI	SI	SI	NO	NO	NO	NO	1,00E+04	1	8,33E+05	6	
E1-Np60-R1	24/05/2024	6,88	0,02	15460,7	60	41,1	7,35	5,6	SI	SI	SI	SI	SI	NO	NO	NO	NO	1,00E+04	1	8,33E+05	4	
E1-Np60-R2	24/05/2024	6,86	0,02	15460,7	60	41,1	7,35	5,4	SI	SI	SI	SI	SI	NO	NO	NO	NO	1,00E+04	1	8,33E+05	6	
E2-Np0-R1	29/05/2024	7	0,02	0	0	24,1	7,9	4,5	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	1,00E+08	4	3,33E+10		
E2-Np0-R2	29/05/2024	6,98	0,02	0	0	24,1	7,9	4,5	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	1,00E+08	2	1,67E+10		
E2-Np30-R1	29/05/2024	6,96	0,02	7865,17	30	34,9	7,55	5,3	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	NO	1,00E+07	5	4,17E+09	1	
E2-Np30-R2	29/05/2024	6,94	0,02	7865,17	30	34,9	7,55	5,2	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	NO	1,00E+07	2	1,67E+09	1	
E2-Np45-R1	29/05/2024	6,92	0,02	11797,8	46	36,5	7,6	5,5	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	NO	1,00E+07	3	2,50E+09	1	
E2-Np45-R2	29/05/2024	6,9	0,02	11797,8	46	36,5	7,6	5,4	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	NO	1,00E+07	3	2,50E+09	1	
E2-Np60-R1	29/05/2024	6,88	0,02	15460,7	60	36,5	7,48	5,6	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	NO	NO	1,00E+06	4	3,33E+08	2	
E2-Np60-R1	29/05/2024	6,86	0,02	15460,7	60	36,5	7,48	5,5	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	NO	1,00E+07	1	8,33E+08	1	
E3-Np0-R1	4/06/2024	7	0,02	0	0	25,9	7,5	5	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	1,00E+08	5	4,17E+10		
E3-Np0-R2	4/06/2024	6,98	0,02	0	0	25,9	7,5	5	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	NO	1,00E+07	1	8,33E+08		
E3-Np30-R1	4/06/2024	6,96	0,02	7865,17	30	37,3	7,07	5,6	SI	SI	SI	SI	SI	NO	NO	NO	NO	1,00E+03	3	2,50E+05	5	
E3-Np30-R2	4/06/2024	6,94	0,02	7865,17	30	37,3	7,07	5,6	SI	SI	SI	SI	SI	SI	NO	NO	NO	1,00E+05	1	8,33E+06	2	
E3-Np45-R1	4/06/2024	6,92	0,02	11797,8	46	39,3	6,97	5,8	SI	SI	SI	NO	NO	NO	NO	NO	NO	1,00E+02	7	5,83E+04	6	
E3-Np45-R2	4/06/2024	6,9	0,02	11797,8	46	39,3	6,97	5,8	SI	SI	SI	SI	NO	NO	NO	NO	NO	1,00E+03	3	2,50E+05	4	
E3-Np60-R1	4/06/2024	6,88	0,02	15460,7	60	40,1	6,93	5,9	SI	SI	SI	NO	NO	NO	NO	NO	NO	1,00E+02	1	8,33E+03	7	
E3-Np60-R1	4/06/2024	6,86	0,02	15460,7	60	40,1	6,93	5,9	SI	SI	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	1,00E+01	2	1,67E+03	6	
E4-Np0-R1	11/06/2024	7	0,02	0	0	24,6	8,29	4,7	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	NO	NO	1,00E+06	1	8,33E+07		
E4-Np0-R2	11/06/2024	6,98	0,02	0	0	24,6	8,29	4,7	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	NO	NO	1,00E+06	2	1,67E+08		
E4-Np30-R1	11/06/2024	6,96	0,02	7865,17	30	27,2	7,99	4,7	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	NO	NO	1,00E+06	1	8,33E+07	0	
E4-Np30-R2	11/06/2024	6,94	0,02	7865,17	30	27,2	7,99	4,7	SI	SI	SI	SI	SI	SI	NO	NO	NO	1,00E+05	1	8,33E+06	1	
E4-Np45-R1	11/06/2024	6,92	0,02	11797,8	46	28,1	7,84	5	SI	SI	SI	SI	SI	SI	NO	NO	NO	1,00E+05	2	1,67E+07	1	
E4-Np45-R2	11/06/2024	6,9	0,02	11797,8	46	28,1	7,84	5	SI	SI	SI	SI	SI	SI	NO	NO	NO	1,00E+05	2	1,67E+07	1	
E4-Np60-R1	11/06/2024	6,88	0,02	15460,7	60	28,6	7,75	4,9	SI	SI	SI	SI	SI	SI	NO	NO	NO	1,00E+05	3	2,50E+07	1	
E4-Np60-R1	11/06/2024	6,86	0,02	15460,7	60	28,6	7,75	4,9	SI	SI	SI	SI	SI	NO	NO	NO	NO	1,00E+04	2	1,67E+06	2	

Apéndice F. Prueba de normalidad y lognormalidad, con el software GraphPad

Figura 11

Resultados prueba normalidad y lognormalidad

Normality and Lognormality Tests Tabular results		A	B	C	D
		0	30	45	60
1	Test for normal distribution				
2	D'Agostino & Pearson test				
3	K2	N too small	N too small	N too small	N too small
4	P value				
5	Passed normality test (alpha=0.05)?				
6	P value summary				
7					
8	Anderson-Darling test				
9	A2*	N too small	N too small	N too small	N too small
10	P value				
11	Passed normality test (alpha=0.05)?				
12	P value summary				
13					
14	Shapiro-Wilk test				
15	W	N too small	N too small	N too small	N too small
16	P value				
17	Passed normality test (alpha=0.05)?				
18	P value summary				
19					
20	Kolmogorov-Smirnov test				
21	KS distance	N too small	N too small	N too small	N too small
22	P value				
23	Passed normality test (alpha=0.05)?				
24	P value summary				

Nota: Tomado del software GraphPad

Apéndice G. Estadística de Kruskal-Wallis

La estadística de Kruskal-Wallis es una medida utilizada para evaluar si existen diferencias significativas entre las medianas de tres o más grupos independientes. Se basa en el rango de los datos en lugar de los valores originales.

- **Fórmula:**

$$H = \frac{12}{N(N+1)} \sum_{i=1}^k \frac{R_i^2}{n_i} - 3(N+1)$$

Donde:

N es el tamaño total de la muestra (el número total de observaciones en todos los grupos).

k es el número de grupos.

R_i es la suma de los rangos de las observaciones en el grupo i .

n_i es el tamaño de la muestra del grupo i .

La estadística de Kruskal-Wallis (H) se compara con una distribución chi-cuadrado (χ^2) con $k-1$ grados de libertad a un nivel de significancia α determinado (normalmente $\alpha=0.05$) para determinar si las diferencias observadas entre las medianas de los grupos son significativas.

El **método incremental en dos etapas de Benjamini, Krieger y Yekutieli (BKY)** es una técnica avanzada utilizada para controlar la tasa de descubrimiento falso (FDR) en análisis de datos. Esta metodología es especialmente relevante en el contexto de análisis donde se realizan múltiples comparaciones simultáneamente, como en su proyecto de evaluación del reactor de cavitación hidrodinámica. (Benjamini et al., 2006).

Apéndice H. Análisis estadístico GraphPad

Figura 12

Resultados Análisis estadístico

VIABILIDAD DE LA CAVITACIÓN EN TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

Kruskal-Wallis test		
ANOVA results		
1	Table Analyzed	Concentración Vs Np
2		
3	Kruskal-Wallis test	
4	P value	0.0044
5	Exact or approximate P value?	Approximate
6	P value summary	**
7	Do the medians vary signif. (P < 0.05)?	Yes
8	Number of groups	4
9	Kruskal-Wallis statistic	13.09
10		
11	Data summary	
12	Number of treatments (columns)	4
13	Number of values (total)	32

Kruskal-Wallis test					
Multiple comparisons					
1	Number of families	1			
2	Number of comparisons per family	6			
3	Q	0.05			
4					
5	Two-stage linear step-up procedure of Benjamini, Krieger and	Mean rank diff.	Discovery?	q value	Individual P Value
6	0 vs. 30	9.875	Yes	0.0491	0.0351
7	0 vs. 45	13.50	Yes	0.0083	0.0040
8	0 vs. 60	15.63	Yes	0.0036	0.0009
9	30 vs. 45	3.625	No	0.3688	0.4391
10	30 vs. 60	5.750	No	0.2307	0.2197
11	45 vs. 60	2.125	No	0.4551	0.6502
12					
13	Test details	Mean rank 1	Mean rank 2	Mean rank diff.	n1
14	0 vs. 30	26.25	16.38	9.875	8
15	0 vs. 45	26.25	12.75	13.50	8
16	0 vs. 60	26.25	10.63	15.63	8
17	30 vs. 45	16.38	12.75	3.625	8
18	30 vs. 60	16.38	10.63	5.750	8
19	45 vs. 60	12.75	10.63	2.125	8
20					

VIABILIDAD DE LA CAVITACIÓN EN TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

Apéndice I. Preparación agua con *Escherichia Coli*.

Figura 13

Caldo Nutritivo



Figura 14

*Cepa de Escherichia Coli
en medio de cultivo*

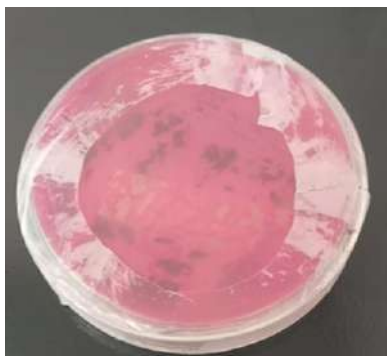


Figura 15

Preparación agua.



Apéndice J. Preparación de agua peptonada y agar chromocult.

Figura 16

Pesaje de agua peptonada.



Figura 17

Pesaje de agar chromocult.



Figura 18

Agua Peptonada 650 mL



Apéndice K. Esterilización de material en Autoclave.

VIABILIDAD DE LA CAVITACIÓN EN TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

Figura 19

Puntas de Micropipeta, Tubos y Pipeta.



Figura 20

Preparación material para esterilización.



Figura 21

Material en Autoclave



Figura 22

Autoclave.



Figura 23

Material esterilizado.



Apéndice L. Agar chromocult en las cajas petri.

VIABILIDAD DE LA CAVITACIÓN EN TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

Figura 24

Vertido de Agar chromocult en cajas petri.



Figura 25

Cajas petri con Agar chromocult



Apéndice M. Montaje del proceso.

Figura 26

Agua contaminada.



Figura 27

Agua en el depósito del sistema.



Figura 28

Sistema de Cavitación Hidrodinámica.

VIABILIDAD DE LA CAVITACIÓN EN TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

**Apéndice N. Toma de muestras y datos.****Figura 29**

Toma muestras del agua.

**Figura 31**

Medición corriente eléctrica.

**Figura 30**

Toma de temperatura.

**Figura 32**

Medición pH.



VIABILIDAD DE LA CAVITACIÓN EN TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

Figura 33

Muestras por cada nivel con duplicados.



Apéndice O. Preparación diluciones y siembra de muestras en medios de cultivo.

Figura 34

Vertido de Agua Peptona en los tubos.



Figura 35

Diluciones



VIABILIDAD DE LA CAVITACIÓN EN TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

Figura 36

Tubos con diluciones.



Figura 37

Siembra de muestras en el medio de cultivo.



Apéndice P. Incubación.

Figura 38

Cajas petri en Incubadora a 37°C.

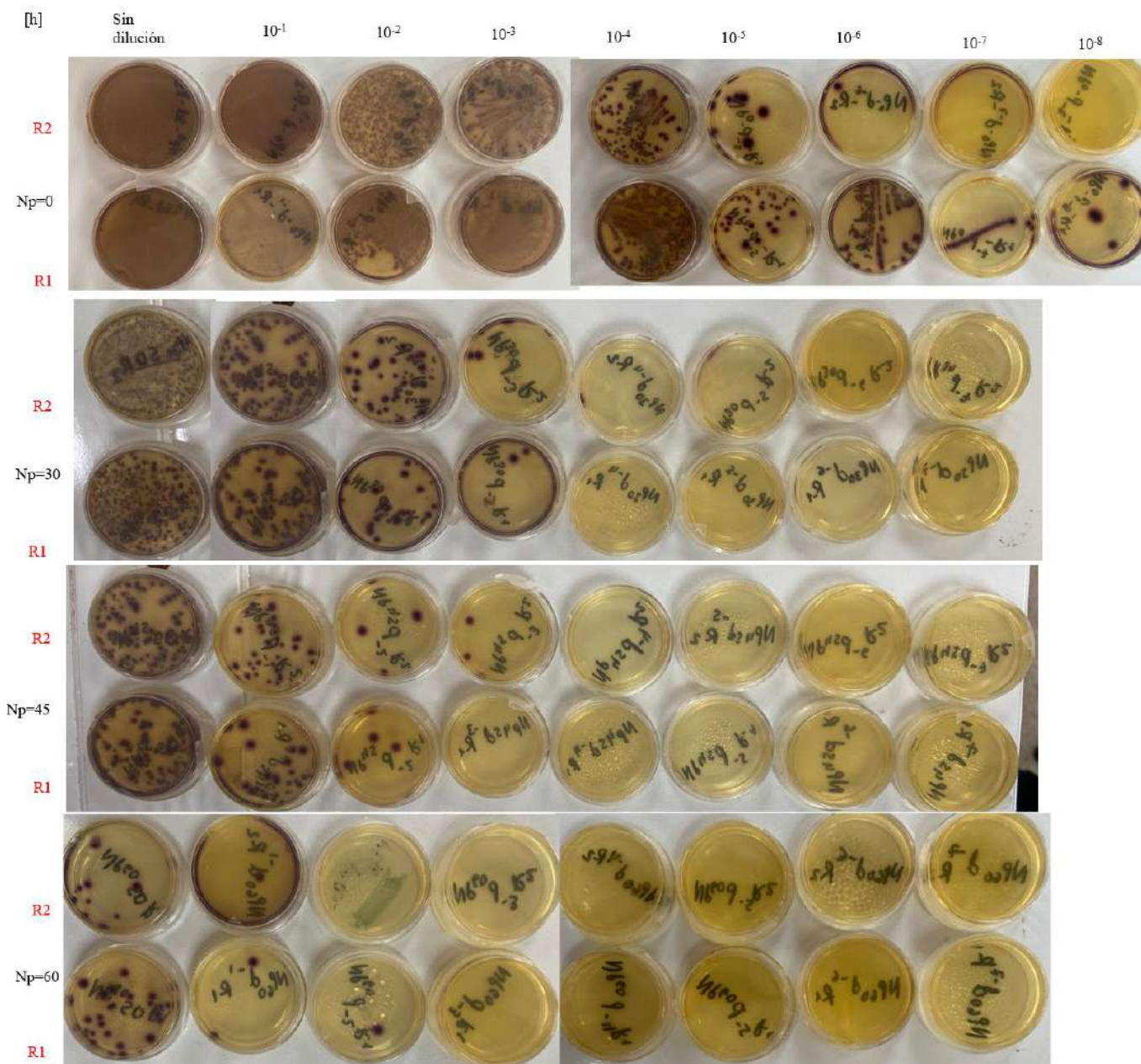


VIABILIDAD DE LA CAVITACIÓN EN TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

Apéndice Q. Resultados.

Figura 39

Resultados del crecimiento microbiano Exp3.



Apéndice R. Procedimiento del Método de Coloración Gram

VIABILIDAD DE LA CAVITACIÓN EN TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

El método de coloración Gram es una técnica de tinción diferencial utilizada en microbiología para clasificar las bacterias en dos grandes grupos: Gram-positivas y Gram-negativas, según las características de sus paredes celulares. A continuación, se describe el procedimiento paso a paso:

Preparación del Frotis Bacteriano:

- Colocar una gota de agua en el portaobjetos.
- Mezclar una pequeña muestra de la bacteria en el agua para formar un frotis delgado.
- Dejar secar y fija el frotis pasando el portaobjetos por la llama de un mechero.

Tinción con Cristal Violeta:

- Cubrir el frotis con cristal violeta durante 1 minuto
- Enjuagar inmediatamente con agua.

Aplicación del Mordiente (Solución de Lugol):

- Cubrir el frotis con solución de lugol durante 1 minuto.
- Enjuagar con agua destilada.

Decoloración:

- Aplicar alcohol o acetona durante 15-20 segundos.
- Enjuagar inmediatamente con agua.

Contra tinción:

VIABILIDAD DE LA CAVITACIÓN EN TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

- Cubrir el frotis con safranina o fucsina básica durante 1 minuto.
- Enjuagar con agua y seca el portaobjetos.

Examinación Microscópica:

- Observar el frotis teñido bajo un microscopio con objetivo de inmersión en aceite (100x).

Apéndice S. Comparación Microscópica de Muestras de Agua con *E. coli*: Antes y Después del Proceso de Cavitación

Figura 40

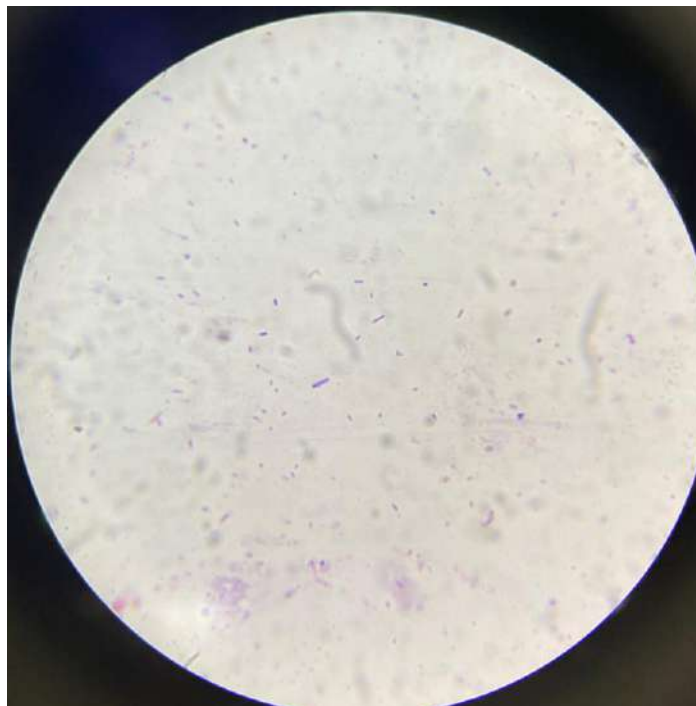
Agua Simulada con E. coli sin Tratamiento (0 Pasadas)



Figura 41

Agua Simulada con E. coli Después del Tratamiento (60 Pasadas)

VIABILIDAD DE LA CAVITACIÓN EN TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES



La comparación entre ambas imágenes indica un éxito en el proceso de cavitación para la desinfección de *E. coli*. La primera imagen, sin tratamiento, muestra una abundante presencia de bacterias con estructuras intactas, lo que confirma una alta carga bacteriana en el agua simulada. Por otro lado, la segunda imagen, después del tratamiento de 60 pasadas, evidencia una drástica disminución en la cantidad de *E. coli* presentes, acompañada por signos de daño celular.

La diferencia en la densidad y el estado de las bacterias entre las dos muestras confirma que la cavitación ha ejercido efectos físicos y mecánicos que han resultado en la desintegración de las células bacterianas. Este resultado corrobora la eficiencia de la cavitación como método de desinfección, alineándose con los objetivos del estudio que buscaban evaluar la tecnología como un medio eficaz para la eliminación de contaminantes microbianos en aguas residuales.