

Maduración tecnológica de la cavitación Rotativa de TRL 5 a TRL 7 evaluando el impacto de la implementación en la compensación ambiental de la tasa retributiva para la empresa AC

Ingeniería Virtual

Angie Fernanda Cobos Sánchez y Gabriela Juliana Suárez Ángel

Director

Hernando Guerrero Amaya

PhD. Electroquímica, Ciencia y tecnología

Tutor

Helver Crispiniano Álvarez Castro

Ingeniero Químico, MSC, PhD.

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físicoquímicas

Escuela de Ingeniería Química

Bucaramanga

2025

Dedicatoria

A nuestros queridos padres, Mercedes Ángel Moreno, Yolanda Sánchez Lizarazo y Juver Martín Cobos Ayala, quienes con su amor incondicional, esfuerzo y sacrificio han sido la luz que ha guiado nuestro camino. Su ejemplo de vida, su sabiduría y su apoyo inquebrantable nos han inspirado a superar cada obstáculo y a perseguir nuestros sueños con determinación. Gracias por cada palabra de aliento, por cada abrazo en los momentos de duda y por enseñarnos que con esfuerzo y dedicación todo es posible. Este logro es tan suyo como nuestro.

Al Equipo Dinamita, nuestros amigos más fieles y confiables, quienes con su cariño, amor y paciencia han sido un pilar fundamental en esta travesía. Gracias por estar en los momentos de alegría y también en los de dificultad, por ser ese refugio seguro donde siempre encontramos apoyo, risas y motivación. Su amistad ha sido un regalo invaluable que atesoramos con gratitud y alegría.

A ustedes, que han caminado a nuestro lado con amor y confianza, les dedicamos este trabajo con todo nuestro corazón.

Agradecimientos

En primer lugar, expresamos nuestra gratitud a Dios, quien nos ha dado la fortaleza, el entendimiento y la paciencia para recorrer este camino, iluminando cada paso con su sabiduría y bendiciones.

A nuestros queridos padres, Mercedes Ángel Moreno, Yolanda Sánchez Lizarazo y Juver Martín Cobos Ayala, por ser nuestro pilar más firme y la fuente inagotable de amor y motivación. Su esfuerzo, dedicación y sacrificios nos han permitido avanzar con confianza y seguridad. Gracias por creer en nosotros, por sus consejos invaluable y por ser el mayor ejemplo de perseverancia y compromiso. Este logro es reflejo de todo lo que nos han enseñado y del inquebrantable apoyo que siempre nos han brindado.

A nuestros entrañables amigos del Equipo Dinamita, quienes con su compañía, empatía y alegría han sido una parte esencial de este proceso. Agradecemos su paciencia en los momentos difíciles, su entusiasmo en los días de éxito y su incondicionalidad a lo largo del camino. Han sido un motor de aliento y una fuente de inspiración que ha hecho que cada obstáculo sea más llevadero y cada logro más significativo.

Finalmente, extendemos nuestro agradecimiento a todas las personas que, de diferentes maneras, han aportado a nuestro crecimiento y formación. Profesores, compañeros y seres queridos que, con su conocimiento, orientación y palabras de aliento, han sido piezas clave en la construcción de este sueño.

Tabla de Contenido

Introducción	13
1. Objetivos	15
1.1 Objetivo General	15
1.2 Objetivos específicos.....	15
2. Marco conceptual.....	16
2.1 Aguas residuales.....	16
2.2 Tratamiento de aguas residuales	16
2.3 Microorganismos presentes en aguas residuales domésticas	17
2.4 Normativa.....	18
2.5 Cavitación.....	18
2.5.1 Cavitación Hidrodinámica rotativa.....	19
2.5.2 Variables operativas importantes en la cavitación hidrodinámica	20
2.5.3 Cavitación hidrodinámica rotativa como método de desinfección de aguas residuales	21
2.6 Nivel de madurez tecnológica.....	22
3. Estado del arte.....	24
4. Metodología	26
4.1 Análisis teórico de la cavitación rotativa.	26
4.1.1 Búsqueda de información	26
4.1.2 Identificación de variables operativas	27

4.1.3 Normatividad y estándares	27
4.1.4 Reconocimiento y ajuste del sistema.....	27
4.2 Fase experimental.....	29
4.2.1 Diseño experimental.....	29
4.2.2 Análisis microbiológico.....	30
4.2.3 Preparación de diluciones seriadas	30
4.2.4 Siembra en placas de agar chromocult	31
4.2.5 Medición del parámetro DBO ₅	31
4.3 Análisis de resultados.....	33
4.3.1 Evaluación de la cavitación rotativa.....	33
4.3.2 Parámetros fisicoquímicos evaluados en el proceso.....	34
4.4 Evaluación del impacto ambiental y económico.....	36
4.4.1 Cálculo del impacto en la tasa retributiva	36
4.4.2 Evaluación del TRL (Technology Readiness Level).....	36
5 Resultados	37
5.1 Análisis gráfico	38
5.2 Análisis estadístico.....	45
5.3 Análisis financiero.....	48
5.4 Análisis del avance tecnológico (TRL).....	50
6 Conclusiones	53

7 Recomendaciones	54
Referencias.....	55
Apéndices.....	59

Lista de tablas

Tabla 1 Variables Operativas en la cavitación rotativa.	20
Tabla 2 Datos de Concentración (UFC/mL).....	37
Tabla 3 Datos de reducción Logarítmica.	37
Tabla 4 Datos parámetro DBO ₅ (mg O ₂ /L).....	43
Tabla 5 Parámetro EEO (kWh/m ₃).	44
Tabla 6 Datos relevantes del análisis estadístico en el software Prism – GraphPad.	46
Tabla 7 Asignación de letras como indicadores para cada número de ciclos evaluado en el software Prism - GraphPad.	46
Tabla 8 Análisis estadístico de comparación evaluado en el software Prism - GraphPad.	47
Tabla 9 Valores supuestos del parámetro de la DBO.	49
Tabla 10 Cálculo ahorro tasa retributiva.....	49
Tabla 11 Indicadores financieros para el proyecto.	50
Tabla 12 Actividades realizadas para la maduración tecnológica del proyecto.	51

Lista de figuras

Figura 1 Esquema metodológico	26
Figura 2 Esquema del sistema de cavitación hidrodinámica rotativa.	28
Figura 3 pHmetro de sobremesa HI 2550.	34
Figura 4 Pinza voltiamperimétrica UNI-TREND UT200A.	35
Figura 5 C/Co vs Número de ciclos para cuatro experimentos.	38
Figura 6 Reducción logarítmica vs Número de ciclos para cuatro experimentos.	39
Figura 7 Temperatura vs Número de ciclos para cuatro experimentos.	41
Figura 8 pH vs Número de ciclos para cuatro experimentos.	41
Figura 9 Organismos patógenos del agua residual	59
Figura 10 Organismos indicadores de contaminación	60
Figura 11 Resultados de las pruebas experimentales.	61
Figura 12 Continuación tabla de resultados de las pruebas experimentales.	61
Figura 13 Prueba de normalidad y lognormalidad en el software GraphPad - Prism.	62
Figura 14 Prueba de normalidad y lognormalidad en el software Python.	62
Figura 15 Resultados de la prueba de normalidad y lognormalidad en el software Python.	63
Figura 16 Prueba de Kruskal-Wallis en el software GraphPad – Prism.	64
Figura 17 Prueba de Kruskal-Wallis en el software Python.	64
Figura 18 Prueba de Dunn con corrección de Bonferroni en el software Python.	65
Figura 19 Continuación de la Prueba de Dunn con corrección de Bonferroni en el software Python.	65
Figura 20 Resultados de la Prueba de Dunn con corrección de Bonferroni en el software Python.	66

Figura 21 Inversión y Operación del proyecto.	67
Figura 22 Cálculo de la depreciación de activos fijos.	67
Figura 23 Modelo de construcción del flujo de caja.	67
Figura 24 Cálculo Tasa Retributiva.	67

Lista de apéndices

Apéndice A. Agentes infecciosos potencialmente presentes en aguas residuales domésticas no tratadas	59
Apéndice B. Resultados datos pruebas experimentales	61
Apéndice C. Prueba de normalidad y lognormalidad.	62
Apéndice D. Prueba de Kruskal-Wallis y Prueba de Dunn con corrección de Bonferroni	63
Apéndice E Análisis Financiero y Cálculos Tasa Retributiva	67

Resumen

Título: Maduración tecnológica de la cavitación Rotativa de TRL 5 a TRL 7 evaluando el impacto de la implementación en la compensación ambiental de la tasa retributiva para la empresa AC Ingeniería Virtual *

Autores: Angie Fernanda Cobos Sánchez, Gabriela Juliana Suárez Ángel **

Palabras clave: Cavitación hidrodinámica rotativa, tratamiento de aguas residuales, tasa retributiva.

Descripción: Este estudio tuvo como objetivo escalar la maduración tecnológica de la cavitación hidrodinámica rotativa (ARHCR) desde un TRL 5 hasta un TRL 7. El avance de TRL 5 a TRL 6 requiere validar la tecnología en un entorno relevante mediante prototipos a escala piloto, lo que permite ajustar variables críticas, optimizar el diseño y evaluar su desempeño técnico. Alcanzar el TRL 7 significa demostrar la viabilidad técnica, económica y ambiental del sistema en operación continua, integrando el cumplimiento normativo y proyectando su escalabilidad a nivel industrial.

La investigación evaluó la aplicación de esta tecnología como método de desinfección terciaria de aguas residuales domésticas y su impacto en la compensación ambiental mediante la reducción de la tasa retributiva. Para ello, se identificaron variables operativas clave como presión, número de ciclos, tiempo de residencia y temperatura. Se diseñó un plan experimental con aguas residuales domésticas reales, empleando un diseño de bloques completos aleatorizados, que permitió evaluar la influencia del número de ciclos (0, 442 y 885) sobre la reducción de coliformes totales y la variación de parámetros fisicoquímicos como pH y temperatura.

Los resultados demostraron que la cavitación rotativa logra una desinfección altamente eficiente, alcanzando reducciones logarítmicas significativas en la concentración bacteriana y disminuyendo la carga orgánica biodegradable, con valores finales de DBOs por debajo de los límites establecidos por la normativa ambiental vigente. Este avance posiciona a la cavitación rotativa como una alternativa innovadora, sostenible y lista para su escalamiento industrial.

*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: Technological maturation of rotary cavitation from TRL 5 to TRL 7, evaluating the impact of implementation on environmental compensation of the remuneration rate for the company AC Ingeniería Virtual*

Authors: Angie Fernanda Cobos Sánchez, Gabriela Juliana Suárez Ángel **

Keywords: Rotating hydrodynamic cavitation, wastewater treatment, remuneration rate.

Description: This study sought to advance the technological maturity of Rotating Hydrodynamic Cavitation (ARHCR) from Technology Readiness Level (TRL) 5 to TRL 7. The transition from TRL 5 to TRL 6 requires validating the technology within a relevant environment through pilot-scale prototypes, thereby enabling the adjustment of critical variables, design optimization, and technical performance assessment. Attaining TRL 7 entails demonstrating the technical, economic, and environmental feasibility of the system under continuous operation, ensuring regulatory compliance, and projecting its scalability to an industrial level.

The research assessed the application of ARHCR as a tertiary disinfection method for domestic wastewater, as well as its potential impact on environmental compensation through the reduction of retributive fees. Key operational variables such as pressure, number of cycles, residence time, and temperature were identified. An experimental design using real domestic wastewater was implemented through a randomized complete block design, which allowed for evaluating the effect of the number of cycles (0, 442, and 885) on the reduction of total coliforms and on the variation of physicochemical parameters, including pH and temperature.

The findings confirmed that rotating cavitation achieves highly efficient disinfection, producing significant logarithmic reductions in bacterial concentration and decreasing the biodegradable organic load. Final BOD₅ values were consistently below the limits established by current environmental regulations. These outcomes position rotating cavitation as an innovative and sustainable alternative, with the robustness and readiness required for industrial scale implementation.

*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, establecida en 2012, es una empresa especializada en ingeniería computacional dentro del contexto de la Industria 4.0. Esta se centra en la digitalización y optimización de procesos industriales mediante herramientas avanzadas de simulación numérica, prototipado, automatización e inteligencia artificial. Su objetivo principal es facilitar la transferencia de conocimiento desde centros de investigación hacia el sector industrial, impulsando la implementación de tecnologías innovadoras para mejorar la eficiencia y sostenibilidad en diversas industrias (ACIV, s. f.).

Acorde a esto la empresa diseñó y construyó un reactor de cavitación hidrodinámica rotativa, destinado a evaluar su efectividad en la desinfección de aguas residuales, particularmente en la eliminación de patógenos. Este proyecto refleja su compromiso con el desarrollo tecnológico y búsqueda de soluciones sostenibles para enfrentar retos ambientales e industriales.

La situación de las aguas residuales domésticas en Colombia es crítica, ya que solo el 30% de estas aguas recibe tratamiento adecuado. Según el DANE, en la región Andina, se trata apenas 0,82 m³/mes de los 10,60 m³/mes generados, lo que equivale a una cobertura por persona de solo 2,58 m³/mes. Por otro lado, de los 1,103 municipios del país, solo 492 cuentan con algún sistema de tratamiento de aguas residuales (STAR). De estos, el 13,9% utiliza sistemas primarios y el 58,9% sistemas secundarios (Bustos & Rivera, 2023). Esta deficiencia en el tratamiento se debe a la falta de infraestructura adecuada, recursos técnicos y financieros, y una débil institucionalidad. Como resultado, de los 75,95 m³/s de aguas residuales descargadas en ríos y afluentes, solo 26,6 m³/s fueron tratados (Bustos & Rivera, 2023). Esta situación genera complejos impactos ambientales y sanitarios, ya que ocasionalmente las aguas residuales sin tratar terminan siendo

utilizadas para riego de cultivos en zonas rurales y, en algunos casos, incluso para consumo humano.

Los métodos convencionales utilizados para el tratamiento de aguas residuales en Colombia incluyen lagunas de estabilización, filtros percoladores, lodos activados y tanques sépticos. Las lagunas de estabilización son sistemas biológicos que requieren grandes extensiones de terreno, mientras que los filtros percoladores utilizan un lecho de material inerte para tratar el agua (Vargas et al, 2020). Aunque estos métodos son comunes, presentan limitaciones significativas en términos de eficiencia, generación de subproductos contaminantes y alto consumo energético, lo que los hace insostenibles a largo plazo.

Ante esta problemática, es esencial explorar alternativas innovadoras que mejoren la eficiencia del tratamiento de aguas residuales. La cavitación hidrodinámica rotativa es un proceso físico que se produce cuando un líquido es sometido a condiciones de alta velocidad y baja presión, lo que provoca la formación, crecimiento y colapso de burbujas de vapor en el líquido, liberando energía en forma de calor y presión, intensificando así las reacciones químicas dentro del líquido (Gutiérrez et al, 2019). Este proceso se presenta como una tecnología prometedora, ya que ha demostrado ser eficaz en la descomposición de contaminantes orgánicos y en la eliminación de patógenos de manera sostenible. Implementar esta tecnología podría contribuir significativamente a mejorar la calidad del agua tratada en Colombia, abordando así las deficiencias actuales en la gestión de aguas residuales y promoviendo un entorno más saludable.

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Escalar la maduración tecnológica de la cavitación Rotativa de TRL 5 a TRL 7 evaluando el impacto de la implementación como método de desinfección terciaria de aguas residuales para AC INGENIERIA VIRTUAL.

1.2 Objetivos específicos

- Analizar principales variables operativas de la tecnología ARHCR y su influencia en la desinfección de aguas de tipo residual para continuar con su madurez tecnológica de TRL5 a TRL7.
- Realizar un diseño experimental con agua residual para determinar la influencia de las variables en la desinfección de aguas residuales.
- Evaluar el impacto de la implementación de cavitación Rotativa en la compensación ambiental de la tasa retributiva.

2. Marco conceptual

El tratamiento de aguas residuales es fundamental para la preservación de los recursos hídricos, ya que el vertimiento de líquidos contaminados puede afectar negativamente la biodiversidad, la salud humana y el equilibrio de los ecosistemas acuáticos. La cavitación hidrodinámica rotativa surge como una tecnología innovadora con el potencial de mejorar la eficiencia en los procesos de desinfección, ofreciendo una alternativa más efectiva y sostenible para el tratamiento del agua residual.

2.1 Aguas residuales

Las aguas residuales son el resultado del uso del agua y los sólidos que, por distintos medios, ingresan al sistema de alcantarillado para su transporte y posterior tratamiento. Se clasifican en diferentes tipos según su origen. Las aguas residuales domésticas provienen de viviendas, edificios comerciales e institucionales. Dentro de las aguas domésticas, se diferencian las aguas negras, que contienen excrementos humanos y orina, y las aguas grises, provenientes de duchas, lavamanos, lavadoras y otras actividades de higiene, con aportes de materia orgánica, fósforo, grasas y coliformes fecales (Romero Rojas, J. A. (2004)).

2.2 Tratamiento de aguas residuales

El tratamiento de las aguas residuales tiene por finalidad remover la carga eutrófica, representada en materia orgánica, materia mineral, sólidos suspendidos, sólidos sedimentables, microorganismos patógenos, entre otros compuestos presentes en el agua; lo que permite clasificar el tratamiento convencional en preliminar, primario, secundario o biológico y terciario.

El tratamiento preliminar, que comprende el cribado, desarenado y la separación de grasas y aceites, se basa en la eliminación física de sólidos de distintos tamaños y materiales de alta

densidad. Su objetivo principal es prevenir daños en los equipos de las etapas posteriores del proceso (Torres, 2012). Por su parte, el tratamiento primario facilita la desestabilización electrostática de las partículas sedimentables, generalmente a través de procesos de coagulación y floculación. Este mecanismo permite reducir hasta un 50% de los sólidos suspendidos sedimentables (SS) y cerca del 40% de los coliformes presentes en el agua (Ibarra Prado et al., 2018; Lorenzo-Acosta, 2006; Torres, 2012).

El tratamiento secundario emplea tecnologías basadas en procesos bioquímicos, en los cuales las aguas residuales son sometidas a reacciones metabólicas llevadas a cabo por microorganismos. Estos organismos tienen la capacidad de degradar la materia orgánica disuelta en el caudal vertido, bajo condiciones controladas que optimizan su eficiencia.

Finalmente, se realiza una desinfección del agua residual para reducir el número de organismos que se han creado en las etapas intermedias. Los métodos más comunes utilizados son la ozonización, tratamiento con luz UV o tratamiento con clorina., aunque la desinfección con cloro sigue siendo la forma más común de desinfección (Jorge, 2020). Estas limitaciones en los métodos convencionales justifican la exploración de alternativas emergentes para la desinfección de aguas residuales domésticas, entre ellas la cavitación hidrodinámica rotativa, la cual se hace énfasis en este proyecto.

2.3 Microorganismos presentes en aguas residuales domésticas

Los principales microorganismos encontrados en el agua residual se clasifican, de acuerdo con sus características celulares, su uso como indicadores de contaminación y en su función como ejecutores del tratamiento biológico, como puede visualizarse en la tabla 9.3 y 9.4 (ver apéndice A).

2.4 Normativa

El tratamiento de aguas residuales está regulado por diversas normativas en Colombia que establecen parámetros de calidad y procedimientos para su manejo. El Decreto 1594 de 1984 establece las normas para el uso y manejo de aguas y residuos líquidos, definiendo los límites permisibles para las aguas vertidas en cuerpos receptores (Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, 1984). Posteriormente, la Resolución 0631 de 2015 actualiza estos parámetros, reglamentando los límites máximos permisibles de contaminantes en vertimientos puntuales a cuerpos de agua superficiales y alcantarillados públicos (*Resolución 631 de 2015, Minambiente*).

Además, la Ley 1333 de 2009 regula los procedimientos sancionatorios en materia ambiental, asegurando el cumplimiento de las normativas relacionadas con vertimientos y tratamiento de aguas residuales (Congreso de la República de Colombia, 2009). La Ley 373 de 1997 establece el reúso obligatorio del agua en actividades que generan afluentes líquidos, promoviendo la eficiencia hídrica y la reducción de la contaminación (Congreso de la República de Colombia, 1997). Por último, el Decreto 1076 de 2015 promueve el reúso del agua residual tratada mediante planes tecnológicos limpios e incluye disposiciones para la gestión gradual del cumplimiento normativo en vertimientos (*Decreto 1076 de 2015, Minambiente*).

2.5 Cavitación

La cavitación es un fenómeno físico que se produce cuando un líquido experimenta una caída de presión por debajo de su presión de vapor, lo que conduce a la formación de burbujas o cavidades de vapor en su interior (Debem, 2025; Redalyc, 2019). Estas burbujas, al moverse hacia zonas de mayor presión, colapsan liberando energía en forma de ondas de choque y generando altas temperaturas y presiones locales. Este proceso puede causar daños significativos en equipos

hidráulicos, como bombas y turbinas, debido a la erosión mecánica y al desgaste de sus componentes (Debem, 2025; Redalyc, 2019).

En aplicaciones industriales, como el tratamiento de aguas residuales o procesos agroindustriales, la cavitación hidrodinámica se utiliza como una tecnología innovadora para mejorar la eficiencia operativa. Esta técnica aprovecha los efectos térmicos, mecánicos y químicos generados por el colapso de las burbujas para promover reacciones químicas o degradar contaminantes (Redalyc, 2019).

2.5.1 *Cavitación Hidrodinámica rotativa*

La cavitación hidrodinámica rotativa es un tipo específico de cavitación hidrodinámica que se produce cuando un líquido experimenta una caída de presión por debajo de su presión de vapor debido a la rotación de un elemento mecánico, como un rotor o una turbina. Este fenómeno ocurre cuando el líquido es sometido a altas velocidades y cambios de presión, lo que conduce a la formación de burbujas o cavidades de vapor en zonas de baja presión (Noria, 2023; Redalyc, 2019).

Durante la cavitación hidrodinámica rotativa, las burbujas formadas crecen mientras permanecen en regiones de baja presión y luego colapsan violentamente al moverse hacia zonas de mayor presión, liberando energía en forma de ondas de choque y generando altas temperaturas y presiones locales (Noria, 2023). Este proceso puede ser aprovechado en aplicaciones industriales para mejorar la eficiencia operativa en procesos como el tratamiento de aguas residuales o la producción de biodiesel, donde los efectos térmicos, mecánicos y químicos del colapso de las burbujas pueden promover reacciones químicas o degradar contaminantes (Redalyc, 2019; ECORFAN, 2023).

2.5.2 Variables operativas importantes en la cavitación hidrodinámica

Tabla 1

Variables Operativas en la cavitación rotativa.

Variable	Descripción	Efecto en el proceso
Presión del sistema	Corresponde a la presión con la que trabaja el fluido dentro del sistema de cavitación.	Una presión adecuada favorece la formación y colapso de cavidades, lo que mejora la eficiencia de desinfección. Presiones demasiado bajas pueden reducir la intensidad de la cavitación, mientras que presiones excesivas pueden generar erosión en los equipos (Agarkoti & Gogate, 2021).
Velocidad de rotación	Indica la velocidad a la que gira el rotor del sistema de cavitación.	Velocidades más altas generan mayor intensidad de cavitación, promoviendo una mayor desinfección. Sin embargo, velocidades excesivas pueden aumentar el desgaste mecánico y el consumo energético (Jyoti & Pandit, 2001).
Tiempo de residencia	Es el tiempo que el fluido permanece expuesto a la cavitación dentro del reactor.	Un mayor tiempo de residencia permite una mayor exposición al colapso de cavidades, lo que favorece la descomposición de contaminantes y microorganismos. Sin embargo, tiempos excesivos pueden incrementar costos operativos sin mejorar significativamente la eficiencia.
Temperatura del fluido	Temperatura del agua que ingresa al sistema.	Temperaturas más altas pueden intensificar los efectos de la cavitación al reducir la viscosidad del fluido, pero también pueden afectar la estabilidad de algunas sustancias tratadas (Bagal & Gogate, 2014).
Número de ciclos	Representa la cantidad de veces que el fluido pasa por el sistema de cavitación.	Aumentar el número de ciclos incrementa la exposición del agua al proceso, lo que puede mejorar la eficiencia de desinfección, pero también aumentar el consumo de energía y el desgaste de los componentes (Gogate, 2007).
Porcentaje de desinfección	Indica la reducción de microorganismos en el agua después del tratamiento.	Depende de las condiciones operativas. Un mayor porcentaje de desinfección significa una eliminación más efectiva de patógenos, optimizando la calidad del agua tratada.

2.5.3 Cavitación hidrodinámica rotativa como método de desinfección de aguas residuales

Esta tecnología aprovecha la formación y colapso de burbujas en un sistema rotativo para generar efectos físicos y químicos capaces de eliminar microorganismos y degradar contaminantes sin necesidad de productos químicos adicionales. Su potencial radica en la combinación de fuerzas mecánicas, temperaturas elevadas y reacciones químicas que desactivan patógenos de manera efectiva.



Cuando las burbujas de cavitación colapsan, las condiciones extremas que se generan pueden alcanzar altas temperaturas y presiones. Este ambiente provoca la disociación del agua, liberando radicales altamente reactivos:

El radical hidroxilo ($\bullet\text{OH}$) es uno de los agentes oxidantes más poderosos y desempeña un papel clave en la desinfección, ya que ataca directamente las membranas celulares de los microorganismos, dañando sus estructuras y evitando su reproducción. Además, el oxígeno disuelto en el agua participa en la formación de otras especies reactivas de oxígeno (ROS), como el superóxido y el peróxido de hidrógeno, el cual refuerza la capacidad desinfectante del proceso.

Los microchorros de alta velocidad y las fuerzas de cizalla que se producen en el colapso de burbujas provocan la ruptura de membranas celulares, desestabilizando por completo las estructuras de bacterias, virus y protozoos. Adicionalmente, las temperaturas localmente elevadas pueden desnaturalizar proteínas y afectar el metabolismo de los microorganismos, reforzando la eliminación de patógenos.

De esta forma, la cavitación hidrodinámica rotativa se consolida como una tecnología con alto potencial de aplicación en el tratamiento terciario de aguas residuales, destacándose por su alta eficiencia en la destrucción del material genético de los microorganismos. Estos efectos combinados respaldan su consideración como un método avanzado de desinfección, cuya madurez tecnológica se evalúa en el presente trabajo con el fin de determinar su viabilidad para su implementación a mayor escala.

2.6 Nivel de madurez tecnológica

El proceso de maduración tecnológica es fundamental para garantizar que una innovación pueda evolucionar desde la fase conceptual hasta su implementación segura y eficiente en condiciones reales de operación. Este proceso se evalúa mediante la escala de Niveles de Madurez Tecnológica (TRL, por sus siglas en inglés), la cual permite medir de manera sistemática el grado de desarrollo de una tecnología. En el TRL 5, la innovación ha sido validada en un entorno controlado de laboratorio, donde se verifica la viabilidad técnica del concepto y se identifican los parámetros clave de funcionamiento. El avance hacia TRL 6 implica la validación en un entorno relevante, es decir, bajo condiciones que simulan de manera representativa el contexto real donde se espera aplicar la tecnología. En esta etapa suelen desarrollarse prototipos a escala piloto que permiten ajustar y optimizar el sistema, evaluando su desempeño técnico y su confiabilidad.

Finalmente, alcanzar el TRL 7 significa que la tecnología ha sido demostrada en condiciones operativas reales, integrando aspectos técnicos, económicos, ambientales y normativos, con el fin de asegurar su viabilidad y su escalabilidad. Este proceso progresivo de maduración es esencial para minimizar riesgos, optimizar recursos y garantizar que las innovaciones sean sostenibles y competitivas en su aplicación práctica (*Technology Readiness Assessment Best Practices Guide*, n.d.).

3. Estado del arte

La cavitación hidrodinámica ha demostrado ser una técnica efectiva y sostenible para el tratamiento de aguas residuales, y su aplicación se ha intensificado en proyectos recientes, como el desarrollado por la Universidad de la Salle. En una investigación de 2015, reportó una eficiencia superior al 90% en la regulación de parámetros como grasas, aceites y sólidos en aguas residuales, tras implementar un sistema de aire por cavitación en una planta de tratamiento de aguas residuales de una empresa de alimentos. Además, un estudio realizado en 2019 por la Universidad Libre encontró que la cavitación hidrodinámica logró una eliminación máxima del 32,6% de la concentración de sulfuros en aguas residuales generadas por el proceso de curtido, sin necesidad de utilizar catalizadores o reactivos químicos adicionales.

Según el estudio de Chand et al. (2007), la combinación de cavitación hidrodinámica y tratamiento con ozono ha mostrado resultados significativos en el proceso de desinfección de aguas. Al utilizar un reactor de silbido líquido (LWR), que genera cavitación hidrodinámica, para desinfectar agua contaminada simulada con *E. coli*, la cavitación por sí sola logró una desinfección del 22% (Chand et al, 2007). Sin embargo, al añadir ozono, la tasa de desinfección aumentó considerablemente, alcanzando un 75% en un tiempo mínimo de tratamiento (Gogate, 2007). Esta combinación no solo mejora la eficacia de la desinfección, sino que también se considera una técnica rentable en comparación con el uso individual de cada método.

En cuanto a los distintos tipos de reactores de cavitación, se han observado diferencias significativas en su eficiencia de eliminación microbiana. El reactor de diodo de vórtice, por ejemplo, logró una eliminación casi completa (99%) de *Escherichia coli* en una hora, con una caída de presión mínima, lo que indica una eficiencia excepcional en la desinfección de este tipo de bacterias (Jain et al, 2019). Por otro lado, el reactor de orificio, que emplea un flujo lineal para

generar cavitación, demostró ser menos eficiente, ya que requirió una caída de presión significativamente mayor, para alcanzar niveles de desinfección comparables a los del diodo de vórtice.

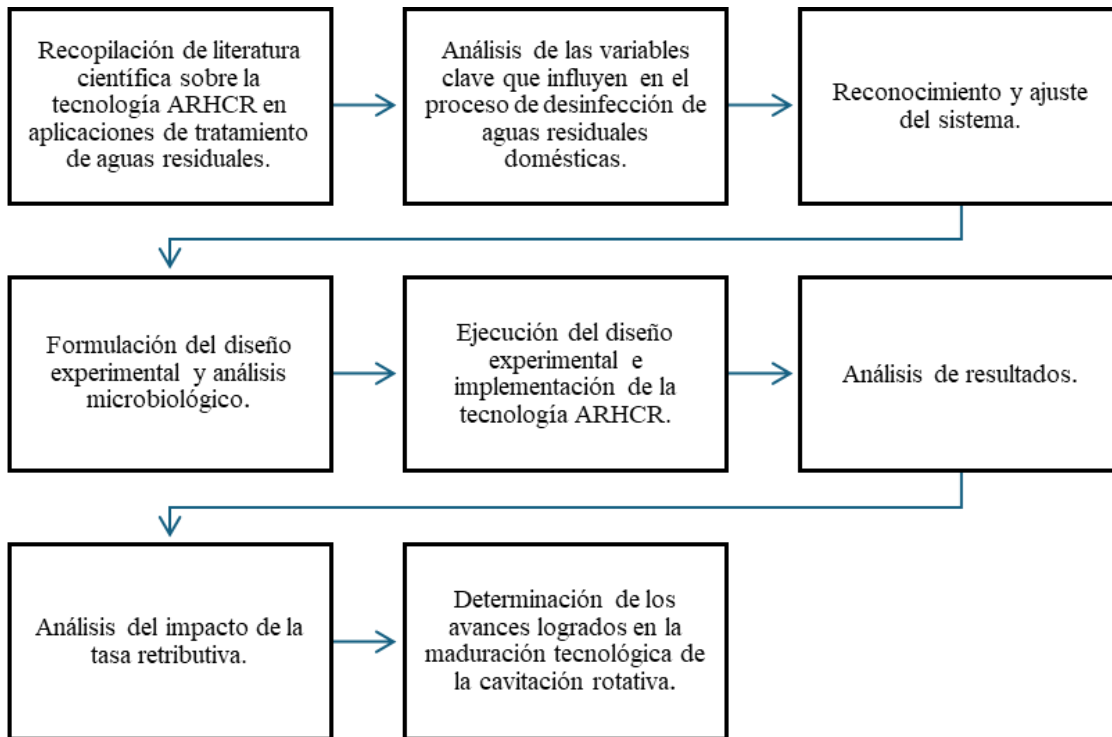
Teniendo en cuenta, el reactor de cavitación hidrodinámica rotacional avanzado (ARHCR) ha demostrado ser un sistema prometedor para la desinfección del agua, al combinar efectos hidrodinámicos y sonoquímicos. Utilizando diferentes caudales y velocidades de rotación, este sistema puede alcanzar una tasa de desinfección del 100% en solo 4 minutos para un volumen específico de agua (Sun et al, 2021). Este rendimiento superior en comparación con los reactores de cavitación hidrodinámica 2 convencionales se traduce en cambios morfológicos significativos en microorganismos como *E. coli*, lo que lo convierte en una solución eficiente para la desinfección de agua.

Los resultados de estos estudios indican que la cavitación hidrodinámica no solo es efectiva para la descomposición de contaminantes orgánicos, sino que también contribuye a la eliminación de patógenos en aguas residuales. Su capacidad para mejorar la desinfección cuando se combina con otras técnicas evidencia su potencial como una alternativa sostenible y eficiente.

4. Metodología

Figura 1

Esquema metodológico



4.1 Análisis teórico de la cavitación rotativa.

4.1.1 *Búsqueda de información*

Se llevó a cabo una recopilación exhaustiva de literatura científica sobre la tecnología ARHCR (cavitación rotativa asistida por hidrodinámica) aplicada al tratamiento de aguas residuales. Se pusieron en énfasis estudios que evaluaron su eficiencia en la desinfección microbiológica, considerando distintos parámetros operativos y condiciones de aplicación. La revisión bibliográfica se realizó de manera sistemática a lo largo de toda la ejecución del proyecto,

utilizando fuentes bibliográficas como libros, sitios web, artículos, patentes y fuentes confiables para asegurar la pertinencia y actualidad de la información recopilada.

4.1.2 *Identificación de variables operativas*

Se analizaron las variables operativas clave que influyen en el proceso de desinfección mediante cavitación rotativa, incluyendo presión, temperatura y el número de ciclos de cavitación (Ver tabla 1). Para ello, se revisaron estudios previos que abordan la cavitación en el tratamiento de aguas residuales, identificando las condiciones óptimas para maximizar la eficiencia en la reducción microbiológica.

4.1.3 *Normatividad y estándares*

Se realizó una revisión detallada de la normativa vigente en Colombia sobre vertimientos de aguas residuales y las tasas retributivas por contaminantes, como la Resolución 0631 de 2015 sobre los parámetros y valores límites máximos permisibles para vertimientos y el Decreto 901 de 1997 sobre el sistema de tasas retributivas. Se identificaron los parámetros que el agua tratada debía cumplir para garantizar la compensación ambiental, alineando los objetivos del estudio con los requisitos regulatorios establecidos por las autoridades ambientales. Además, se analizaron normativas internacionales para establecer comparaciones y evaluar el potencial de adopción de la tecnología en otros contextos.

4.1.4 *Reconocimiento y ajuste del sistema*

El proceso de montaje del sistema inició con la organización de los materiales de acuerdo con la dirección técnica proporcionada por la empresa. A continuación, se realizó el ensamblaje de las tuberías, las cuales fueron interconectadas a través de un recipiente para conformar un circuito cerrado. Para garantizar la estabilidad estructural del reactor de cavitación y del motor de

la bomba durante la operación, se fabricó una base de madera. Posteriormente, se completó el ensamblaje al conectar las tuberías al sistema y asegurar su correcta integración con el motor. Finalmente, se efectuaron pruebas hidrodinámicas con el propósito de detectar posibles fugas y verificar la integridad del sistema antes de su funcionamiento.

Figura 2

Esquema del sistema de cavitación hidrodinámica rotativa.



Se puso en marcha el sistema y se midió el caudal del ARHCR, obteniendo un caudal de 1.7205 L/s, el volumen de agua utilizado es de 28 L.

$$Q = \frac{np \cdot V}{t} \quad (\text{Ec. 8})$$

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

4.2 Fase experimental

4.2.1 *Diseño experimental*

Se diseñó e implementó un protocolo experimental para evaluar la tecnología de cavitación rotativa utilizando muestras de agua residual doméstica real, recolectadas en la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Río Frío (EMPAS), correspondiente al tratamiento secundario, asegurando las condiciones necesarias para implementar la tecnología ARHCR como tratamiento terciario. El diseño incluyó la medición de variables clave, tales como pH, temperatura y corriente eléctrica, en cada una de las tomas de muestra. Las muestras se recolectaron en tres momentos específicos: antes de la aplicación del tratamiento de cavitación, después de un tiempo intermedio de tratamiento y al finalizar un periodo de cuatro horas de operación.

Una vez seleccionados las variables de operación, se seleccionó el tipo de diseño experimental que mejor se adaptara a los objetivos del proyecto, el cual consiste en evaluar el efecto del número de ciclos por el reactor de cavitación hidrodinámica rotativa en la reducción de la concentración de coliformes totales presentes en el agua residual doméstica real. Por esta razón, se eligió el diseño de bloques completos aleatorizados (RCBD, *randomized complete block design*).

Se establecieron cuatro bloques (cuatro experimentos independientes), con un factor de interés que es el número de ciclos, el cual se evaluó en tres niveles (0, 442 y 885), los cuales corresponden a la toma de muestras en tres tiempos (0, 2 horas y 4 horas). Para cada nivel se realizaron réplicas, permitiendo asegurar la confiabilidad, validez de los resultados y un análisis detallado de la evolución de la concentración bacteriana a lo largo del proceso (Bandh & Mushtaq,

2025). Considerando lo anterior se llega a un total de 6 unidades por bloque y 24 experimentos en total.

4.2.2 *Análisis microbiológico*

Se recolectaron muestras para análisis biológico antes y después de implementar la tecnología ARHCR, con el objetivo de evaluar su capacidad para reducir la concentración de los coliformes totales presentes en las aguas residuales domésticas. Se compararon las concentraciones de estos microorganismos antes y después del ensayo, considerando la variación de los niveles utilizados (número de ciclos). Se aplicó el siguiente procedimiento para cada uno de los experimentos realizados.

4.2.3 *Preparación de diluciones seriadas*

1. Preparar solución de Agua peptonada.
2. Colocar los frascos de medios de cultivo (erlenmeyers), agua peptona, tubos de ensayo, pipetas y puntas de micropipetas dentro del AUTOCLAVE para proceso de esterilización.
3. Agregar 9 mL de solución de Agua de Peptona a todos los tubos de ensayo y cerrar el tubo.
4. Transferir 1000 μL de la muestra obtenida del sistema al primer tubo de ensayo y mezclar para obtener una dilución 1:8.
5. Repetir el proceso de transferencia del tubo de ensayo anteriormente mezclado al siguiente tubo, homogeneizando entre muestras para obtener diluciones adicionales sucesivamente hasta 1×10^{-7} .

4.2.4 *Siembra en placas de agar chromocult*

1. Colocar las cajas petri dentro del AUTOCLAVE para el proceso de esterilización.
2. Preparar cajas petri con el agar chromocult.
3. Transferir 1000 μL de cada dilución a una caja petri utilizando la técnica de siembra en superficie con una micropipeta estéril (MICROPIPETA MICROPETTE DLAB).
4. Extender uniformemente el líquido en la superficie del agar, dejando que las cajas se sequen completamente antes de incubarlas.
5. Sellar y marcar las cajas petri con cinta adhesiva y organizarlas en el INCUBADOR IN30 boca abajo para mantener la integridad del medio de cultivo y tener un crecimiento uniforme a 37°C durante 24 horas.

4.2.5 *Medición del parámetro DBO₅*

La DBO₅ es un parámetro que permite cuantificar la cantidad de oxígeno disuelto (mg/L) consumido por microorganismos aerobios durante un periodo de incubación de cinco días a 20 °C, en condiciones oscuras, al degradar materia orgánica biodegradable presente en una muestra de agua residual.

1. Preparación de soluciones nutrientes esenciales:

Solución de fosfatos (Buffer + fuente de nitrógeno)

- KH_2PO_4 (fosfato monopotásico): 8,50 g
- K_2HPO_4 (fosfato dipotásico): 21,75 g
- $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ (fosfato disódico heptahidratado): 33,40 g

- NH_4Cl (cloruro de amonio): 1,70 g
- Disolver en agua destilada
- Almacenar refrigerada.

Solución de Cloruro de Calcio

- CaCl_2 anhidro: 27,5 g ó $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$: 36,4 g
- Disolver en agua destilada.

Solución de Sulfato de Magnesio

- $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$: 22,5 g
- Disolver en agua destilada.

Solución de Cloruro Férrico

- $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$: 0,25 g
- Disolver en agua destilada.
- Usar frasco ámbar.

2. Preparación del agua de dilución (por cada litro)

El agua de dilución se obtiene aireando agua destilada durante al menos 24 horas. Por cada litro de esta agua, se adiciona 0,4 mL de cada solución nutritiva previamente mencionada.

3. Preparación de muestras

Se toman 2 muestras, una muestra inicial sin cavitación y una muestra final cavitada después de 4 horas. Estas muestras, se envasan en botellas Winkler de 300 mL, donde se tuvo en cuenta para la primera: muestra residual doméstica y agua de dilución con nutrientes. Y para la segunda: muestra residual doméstica tratada, agua de dilución con nutrientes e inóculo. Luego se llenan completamente las botellas, sin dejar burbujas de aire y se tapan herméticamente.

4. Medición e incubación

Se mide el oxígeno disuelto inicial de ambas muestras (OD_0) utilizando un equipo calibrado de medición de oxígeno disuelto (HANNA HI98193). Posteriormente, las botellas se incuban a 20 °C en oscuridad absoluta durante cinco días. Finalizado este periodo, se mide nuevamente el oxígeno disuelto de ambas muestras (OD_5). La diferencia entre OD_0 y OD_5 permite calcular el valor de DBO_5 .

4.3 Análisis de resultados

4.3.1 Evaluación de la cavitación rotativa

Se llevó a cabo la implementación de la tecnología ARHCR, realizando ajustes en las variables operativas previamente identificadas. La evaluación del proceso incluyó la cuantificación de Unidades Formadoras de Colonias (UFC) de coliformes totales, con el fin de determinar la eficacia del tratamiento en la reducción microbiológica. Los resultados obtenidos se compararon con las condiciones iniciales del agua residual para evaluar la eficiencia del sistema en la desinfección. Además, se analizaron posibles variaciones en los parámetros fisicoquímicos del agua, asegurando que el tratamiento no generará efectos adversos en la calidad del efluente.

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):

$$\frac{UFC}{ml} = \frac{Número\ de\ colonias\ contadas * Factor\ de\ dilución}{Volumen\ Inoculado\ (mL)} \quad (Ec. 9)$$

La reducción logarítmica (LR) de microorganismos se calculó mediante la siguiente expresión:

$$LR = -\log_{10} \left(\frac{C_0}{C} \right) \quad (\text{Ec. 10})$$

Donde C_0 es la concentración inicial de microorganismos (UFC/mL) antes del tratamiento y C la concentración final después del tratamiento.

4.3.2 *Parámetros fisicoquímicos evaluados en el proceso.*

Definimos los siguientes parámetros para analizar su comportamiento durante la fase experimental y observar los resultados de esta misma.

Medición del pH: Se determinó el pH del agua antes y después de cada serie de pasadas utilizando un pH-metro de sobremesa HI 2550, HANNA®, con el fin de identificar posibles variaciones en la acidez o alcalinidad que pudieran influir en el crecimiento de coliformes totales presentes en las muestras del agua residual doméstica.

Figura 3

pHmetro de sobremesa HI 2550.



Registro de la Corriente Eléctrica del Motor de la bomba: La corriente eléctrica consumida por el motor de la bomba y el motor del cavitador durante la operación del reactor fue medida mediante una pinza voltiamperimétrica UNI-TREND UT200A. Este monitoreo permite

analizar la estabilidad del sistema, así como su demanda energética a medida que se incrementó el número de ciclos.

Figura 4

Pinza voltiamperimétrica UNI-TREND UT200A.



Control de la Temperatura del Agua: La temperatura del agua se registró en cada punto de muestreo utilizando un pH-metro de sobremesa HI 2550, HANNA®. Dado que la cavitación puede generar un aumento térmico, fue fundamental supervisar esta variable para evitar efectos adversos en la eficiencia del proceso y en la calidad de las muestras.

Estas mediciones complementarias facilitaron una evaluación integral de las condiciones operativas del reactor y su influencia en la desinfección. Los datos obtenidos fueron analizados para establecer correlaciones entre las fluctuaciones de pH, corriente eléctrica y temperatura con el crecimiento de coliformes totales presentes en las muestras del agua residual doméstica.

4.4 Evaluación del impacto ambiental y económico

4.4.1 *Cálculo del impacto en la tasa retributiva*

Para evaluar el impacto de la cavitación rotativa en la compensación ambiental de la tasa retributiva, se diseñó un estudio experimental centrado exclusivamente en la evolución del parámetro Demanda Bioquímica de Oxígeno a cinco días (DBO₅), como indicador representativo de la carga orgánica biodegradable presente en aguas residuales domésticas. Inicialmente, se recolectaron muestras de aguas residuales domésticas sin tratar, a las cuales se les determinó la concentración de DBO₅ conforme a los lineamientos establecidos en la Norma Técnica Colombiana NTC 4219 (ICONTEC, 2008). Este valor fue considerado como línea base para el análisis del efecto del tratamiento. Posteriormente, estas mismas muestras fueron sometidas al proceso de cavitación rotativa bajo condiciones controladas (tiempo de operación, caudal, presión y temperatura), con un tiempo total de tratamiento de cuatro horas, en el cual el agua fue expuesta al fenómeno hidrodinámico de cavitación. Una vez finalizado el proceso, se tomaron muestras del efluente tratado y se repitió el análisis de DBO₅, empleando el mismo protocolo utilizado para la muestra inicial.

4.4.2 *Evaluación del TRL (Technology Readiness Level)*

Se evaluó el nivel de madurez tecnológica (TRL) de la cavitación rotativa, contrastando los avances alcanzados en esta investigación con otros proyectos similares enfocados en el tratamiento de aguas residuales. Este análisis permitió determinar que la tecnología ha progresado hasta un TRL 7, definido por la demostración del sistema en condiciones reales de operación.

5 Resultados

Los resultados obtenidos a lo largo del presente estudio permiten evidenciar la efectividad del proceso de cavitación hidrodinámica rotativa como tecnología de desinfección terciaria en el tratamiento de aguas residuales domésticas (Ver tabla 2 y 3). A través de un diseño experimental controlado, se analizó la influencia de variables operativas como el número de ciclos, la temperatura y el pH sobre la reducción logarítmica de coliformes totales, así como la variación en los valores de DBO₅ antes y después del tratamiento.

Tabla 2

Datos de Concentración (UFC/mL).

Concentración (UFC/mL)								
Número ciclos	EXP 1		EXP 2		EXP 3		EXP 4	
	R1	R2	R1	R2	R1	R2	R1	R2
0	3,9x10 ⁸	3,8x10 ⁸	4,0x10 ⁸	3,7x10 ⁸	1,8x10 ⁸	2,0x10 ⁸	3,2x10 ⁶	2,8x10 ⁶
442	3,7x10 ⁴	3x10 ⁴	1,8x10 ³	1,3x10 ³	2,8x10 ⁵	2,4x10 ⁵	2,1x10 ⁴	1,6x10 ⁴
885	1,0x10 ²	0	1,0x10 ²	8,0x10 ¹	3,6x10 ⁴	2,3x10 ⁴	1,8x10 ²	1,0x10 ²

Tabla 3

Datos de reducción Logarítmica.

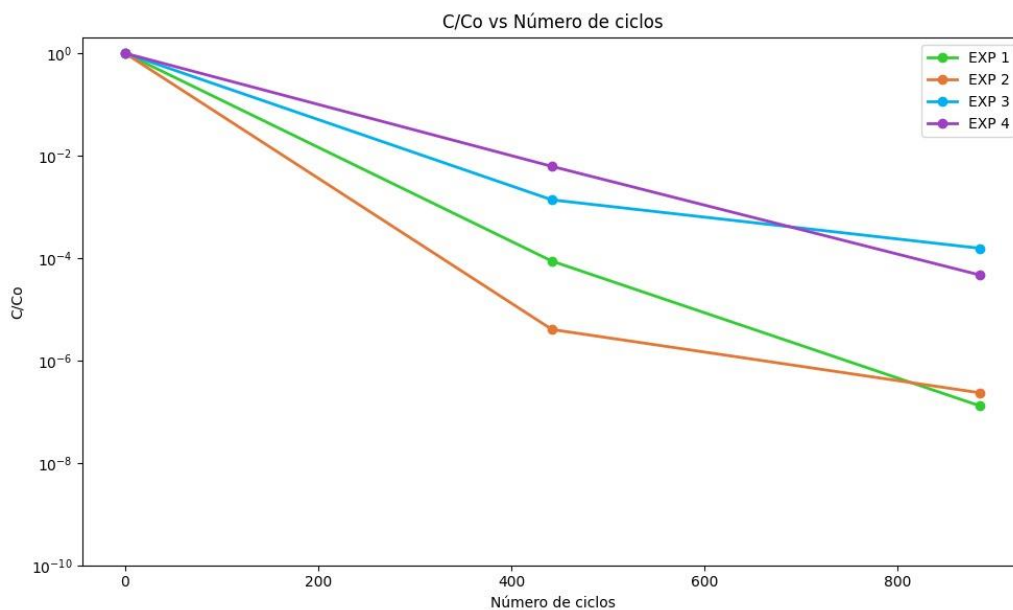
Reducción Logarítmica									
Número ciclos	EXP 1		EXP 2		EXP 3		EXP 4		Media
	R1	R2	R1	R2	R1	R2	R1	R2	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
442	4	4	5	5	3	3	2	2	4
885	7	-	7	7	4	4	4	4	5

5.1 Análisis gráfico

El análisis gráfico permite visualizar de manera clara la tendencia de los datos experimentales obtenidos durante el proceso de cavitación hidrodinámica rotativa, facilitando la interpretación de la relación entre las variables operativas y la eficiencia de desinfección.

Figura 5

C/C₀ vs Número de ciclos para cuatro experimentos.



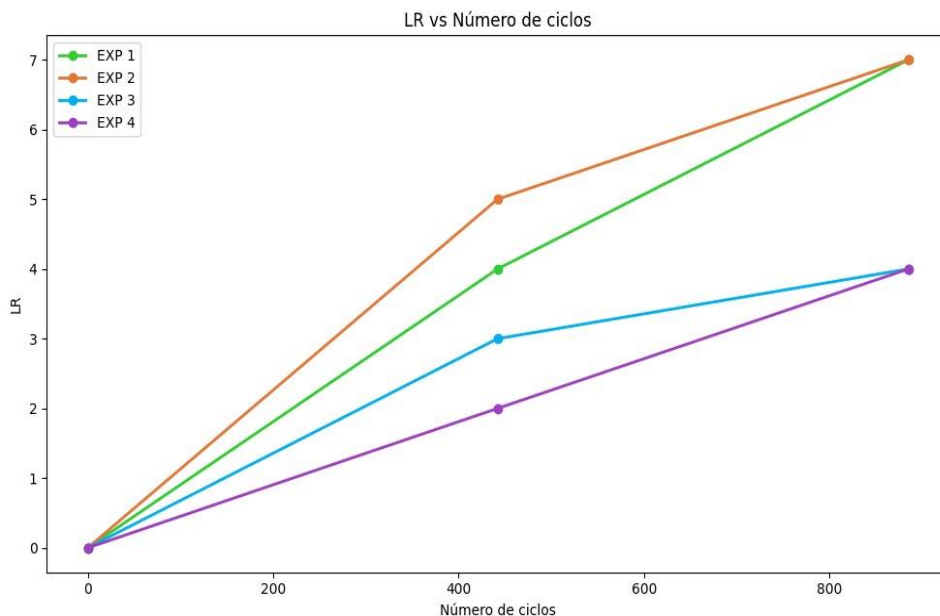
El comportamiento de la relación C/C_0 (concentración final de bacterias/concentración inicial) en función del número de ciclos del agua a través de un cavitador hidrodinámico rotativo, utilizado como método de desinfección para agua residual doméstica. En todos los experimentos, se evidencia una disminución progresiva de esta relación a medida que aumenta el número de ciclos, lo que refleja una tendencia significativa hacia la reducción de la carga bacteriana presente en el agua tratada.

La relación C/C_0 es una forma estandarizada de representar la eficiencia de procesos de desinfección. Un valor de C/C_0 menor a 1 indica que la concentración de bacterias después del tratamiento es menor que la concentración inicial, lo cual es fundamental para demostrar que el proceso ha sido efectivo. Cuanto menor sea este valor, mayor será la eficiencia de eliminación de microorganismos patógenos.

El comportamiento decreciente de la curva en escala logarítmica indica que la cavitación hidrodinámica produce efectos acumulativos en la inactivación bacteriana, posiblemente mediante mecanismos físicos como el colapso de microburbujas y la generación de radicales libres, que dañan las estructuras celulares microbianas (Gogate & Pandit, 2004). Esto sugiere que, a medida que el agua recircula a través del cavitador en múltiples ciclos, se incrementa el tiempo de exposición y, con ello, la eficiencia del proceso de desinfección.

Figura 6

Reducción logarítmica vs Número de ciclos para cuatro experimentos.



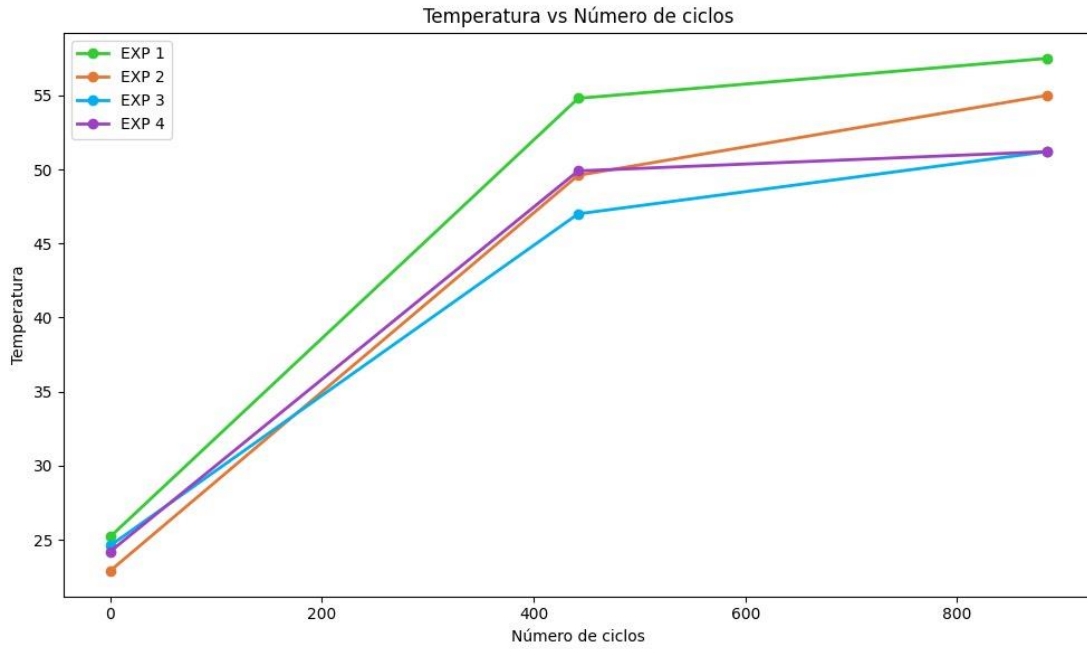
Según los resultados obtenidos en la gráfica 2, la reducción logarítmica (LR) de la concentración bacteriana incrementó progresivamente con el aumento del número de ciclos de tratamiento (0, 442 y 885 ciclos), lo cual evidencia el efecto de la cavitación hidrodinámica rotativa sobre la inactivación microbiológica en aguas residuales domésticas.

En el experimento 1, la LR fue de 0 unidades al inicio del tratamiento, alcanzando aproximadamente 4 unidades logarítmicas a los 442 ciclos y cerca de 7 unidades al finalizar los 885 ciclos. En el experimento 2, la LR también inició en 0, aumentando a cerca de 5 unidades a los 442 ciclos y llegando a un valor final aproximado de 7 unidades logarítmicas, indicando una eficiencia de desinfección equivalente. En el experimento 3, la LR partió de 0 unidades, incrementándose a aproximadamente 3 unidades a los 442 ciclos y alcanzando cerca de 4 unidades al final del tratamiento. De forma similar, en el experimento 4 se observó una LR inicial de 0 unidades, con una reducción intermedia de aproximadamente 2 unidades a los 442 ciclos y un valor final de 4 unidades logarítmicas a los 885 ciclos.

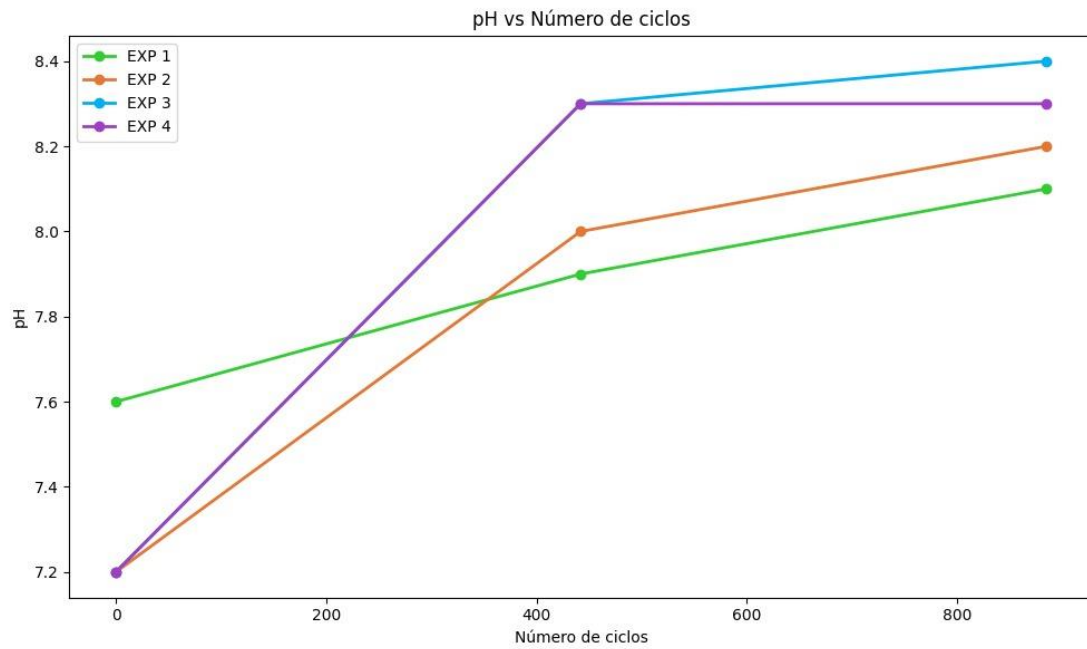
Estos resultados demuestran que el proceso de cavitación hidrodinámica rotativa constituye una alternativa tecnológica eficaz para la desinfección de aguas residuales, al lograr reducciones logarítmicas significativas en la concentración bacteriana con el incremento del número de ciclos de tratamiento.

Figura 7

Temperatura vs Número de ciclos para cuatro experimentos.

**Figura 8**

pH vs Número de ciclos para cuatro experimentos.



El análisis de los parámetros fisicoquímicos medidos, específicamente la temperatura y el pH, permite establecer su influencia directa sobre la eficiencia del sistema en términos de reducción logarítmica bacteriana. En cuanto a la temperatura, las gráficas muestran un incremento progresivo con el número de ciclos de cavitación para todos los experimentos. Este comportamiento es esperado debido a la energía mecánica disipada en el sistema, que se transforma parcialmente en energía térmica como resultado del colapso de burbujas. Dicho aumento de temperatura contribuye significativamente al proceso de desinfección, ya que a temperaturas elevadas se incrementa la tasa de desnaturalización de proteínas y la permeabilización de membranas celulares bacterianas, facilitando la inactivación microbiana (Gogate & Pandit, 2004).

Por otro lado, el comportamiento del pH a lo largo del tratamiento evidencia una ligera tendencia al aumento en todos los casos, manteniéndose en un rango alcalino (aproximadamente entre 7,2 y 8,5). Este intervalo de pH puede influir positivamente en los procesos de cavitación, ya que se ha demostrado que en medios ligeramente básicos se potencia la estabilidad de los radicales hidroxilos y se favorece la ionización de compuestos orgánicos, lo que mejora su susceptibilidad a la oxidación.

La Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅) es uno de los principales indicadores de calidad del agua, ya que refleja la cantidad de oxígeno necesaria para que los microorganismos degraden la materia orgánica presente en un efluente. Este parámetro es de gran importancia en la gestión ambiental, pues su cuantificación permite evaluar el impacto de los vertimientos sobre los cuerpos hídricos y la eficiencia de los sistemas de tratamiento. En Colombia, la DBO₅, reglamentada por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible mediante las resoluciones 273 de 1997 y 372 de 1998; es uno de los parámetros objeto de cobro dentro de la Tasa Retributiva

por Vertimientos Puntuales al Agua, instrumento económico diseñado para incentivar la reducción de la carga contaminante y generar conciencia sobre los efectos ambientales de las descargas.

Tabla 4

Datos parámetro DBO₅ (mg O₂ /L).

Muestra	DBO (mg O₂ /L)		
	EXP 2	EXP 3	PROMEDIO
Inicial	10,59	9,31	9,95
Final	0,72	7,23	3,98

La diferencia en los valores de DBO observados tras el tratamiento puede explicarse, en parte, por procesos de oxidación química inducidos por cavitación rotativa. Esta tecnología genera radicales altamente reactivos, como el radical libre hidroxilo ($\bullet\text{OH}$), que degradan compuestos orgánicos complejos sin requerir una actividad biológica prolongada. Sin embargo, pese a la acción fisicoquímica de la cavitación, los microorganismos siguen desempeñando un papel clave en la medición de este parámetro. La DBO se cuantifica a partir del oxígeno consumido por bacterias aeróbicas durante un período estándar de cinco días (DBO₅). Por tanto, si después del tratamiento hay menos sustratos disponibles para su metabolismo, el consumo de oxígeno disminuye, y esto se refleja directamente en una menor DBO.

Este descenso en los valores indica que los compuestos biodegradables fueron reducidos significativamente, lo cual limita la actividad microbiana posterior y, en consecuencia, la necesidad de oxígeno. Para evaluar si estos resultados cumplen con la normativa ambiental, es necesario contrastarlos con los límites establecidos en la Resolución 0631 de 2015 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de Colombia, la cual fija un valor máximo de 150 mg O₂/L de DBO₅ para vertimientos a cuerpos de agua superficial (*Resolución 631 de 2015, Minambiente*).

Dado que los valores finales obtenidos en los experimentos (0,72 y 7,23 mg O₂/L) se encuentran ampliamente por debajo de este límite (Ver tabla 7), se concluye que el tratamiento aplicado no solo es efectivo, sino que cumple satisfactoriamente con la regulación ambiental vigente.

Además del cumplimiento normativo alcanzado en cuanto a la reducción de la DBO₅, resulta pertinente analizar la eficiencia energética del proceso aplicado. Para ello, se calculó el consumo energético específico (EEO, Electric Energy per Order of Reduction), expresado en kWh/m³ (Ver tabla 8), el cual permite relacionar la energía eléctrica empleada con la reducción lograda en la concentración de contaminantes.

$$E_{EO} = \frac{P}{Q \cdot \log_{10}\left(\frac{C_0}{C}\right)} \quad (\text{Ec. 11})$$

Tabla 5

Parámetro EEO (kWh/m₃).

Experimento	Voltaje (V)	Factor de Potencia	Co/C (UFC/mL)	Log ₁₀ (Co/C) (UFC/mL)	Corriente Eléctrica (A)	Q (L/s)	P(kW)	EEO (kWh/m ₃)
EXP 1	110	0,92	3,00	0,477	7	1,721	0,708	0,863
EXP 2	110	0,92	3,00	0,477	6,2	1,721	0,627	0,764
EXP 3	110	0,92	3,00	0,476	6,56	1,721	0,664	0,810
EXP 4	110	0,92	2,98	0,474	5,89	1,721	0,596	0,730

Los valores obtenidos se encuentran en un rango aceptable para procesos de desinfección para el tratamiento de aguas residuales, lo cual indica que el sistema no solo es capaz de cumplir

con los estándares de calidad ambiental, sino que además mantiene un consumo energético relativamente bajo y estable a lo largo de las pruebas realizadas.

5.2 Análisis estadístico

Con el objetivo de determinar si el número de ciclos de cavitación hidrodinámica rotativa influye significativamente en la reducción de la concentración bacteriana en aguas residuales domésticas, se llevó a cabo un análisis estadístico utilizando el software GraphPad Prism, complementado con la validación de resultados mediante un código en Python, con el fin de garantizar la confiabilidad de estos mismos. Teniendo en cuenta lo anterior, se planteó una hipótesis nula y una hipostesis alternativa.

Hipótesis nula (H_0): No existen diferencias significativas en la concentración bacteriana entre los diferentes números de ciclos (0, 442, 885).

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

Dado que los datos no cumplían con los supuestos de normalidad requeridos para aplicar un ANOVA paramétrico, se optó por utilizar la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis (Ver apéndice C), ya que es la alternativa más adecuada para comparar más de dos grupos independientes sin asumir que los datos siguen una distribución normal ni que presentan varianzas homogéneas. A diferencia del ANOVA, que exige estos supuestos, Kruskal-Wallis se basa en los rangos de los valores en lugar de los promedios, lo que la hace más apropiada para conjuntos de datos pequeños, con posibles valores atípicos o con escalas que no cumplen criterios de

normalidad. Esto permite una comparación más robusta y confiable entre los cuatro grupos evaluados, aumentando la validez de los resultados.

Tabla 6

Datos relevantes del análisis estadístico en el software Prism – GraphPad.

Número de Familias	1
Número de comparaciones por familia	3
Alfa	0,05

Tabla 7

Asignación de letras como indicadores para cada número de ciclos evaluado en el software Prism - GraphPad.

Indicador número de ciclos	
0	A
442	B
885	C

El análisis comparó tres grupos experimentales: sin tratamiento (0 ciclos), tratamiento con 442 ciclos y tratamiento con 885 ciclos (Ver tabla 4 y 5). El estadístico de Kruskal-Wallis arrojó un resultado estadísticamente significativo ($p < 0,05$), lo que indica que existe al menos un grupo cuya mediana de reducción bacteriana difiere significativamente respecto a los otros. Este hallazgo sugiere que el tratamiento mediante cavitación tiene un efecto diferencial según el número de ciclos aplicados. Para identificar entre cuáles grupos se encontraban estas diferencias significativas, se aplicó la prueba post hoc de comparaciones múltiples de Dunn (Ver tabla 6), con corrección de Bonferroni para controlar el error tipo I asociado a las comparaciones múltiples. Esta prueba permite realizar comparaciones pareadas entre grupos, basándose en los rangos promedio

y no en los valores originales, manteniendo así la naturaleza no paramétrica del análisis (Ver apéndice D).

Tabla 8

Análisis estadístico de comparación evaluado en el software Prism - GraphPad.

Prueba de comparaciones múltiples de Dunn	Diferencia de rango medio	¿Significativo?	Resumen	Valor P ajustado	
0 vs. 442	9,125	Sí	*	0,0294	A-B
0 vs. 885	14,88	Sí	****	<0,0001	A-C
442 vs. 885	5,75	No	ns	0,3107	B-C

Detalles de la prueba	Rango medio 1	Rango medio 2	Diferencia de rango medio	n1	n2	Z
0 vs. 442	20,5	11,38	9,125	8	8	2,583
0 vs. 885	20,5	5,625	14,88	8	8	4,211
442 vs. 885	11,38	5,625	5,75	8	8	1,628

Este análisis reveló que existen diferencias estadísticamente significativas entre el grupo sin tratamiento (0 ciclos) y los grupos tratados con 442 ciclos ($p = 0,0294$) y 885 ciclos ($p < 0,0001$), lo que confirma que la cavitación tiene un efecto claro en la desinfección del agua residual doméstica.

No obstante, al comparar los grupos tratados con 442 y 885 ciclos, no se observó una diferencia significativa ($p = 0,3107$). Este resultado sugiere que, bajo las condiciones evaluadas, incrementar el número de ciclos más allá de 442 no genera una mejora estadísticamente relevante en la reducción bacteriana. Los análisis realizados permiten concluir que la cavitación hidrodinámica rotativa es efectiva en la reducción de la carga bacteriana de aguas residuales, y que dicha efectividad está relacionada con el número de ciclos aplicados. Además, el enfoque estadístico adoptado basado en métodos no paramétricos asegura la validez y solidez de las conclusiones, al

adaptarse adecuadamente a las características reales de los datos obtenidos en condiciones experimentales.

5.3 Análisis financiero

Para realizar las proyecciones financieras del proyecto, se contempla hacer el montaje de una planta de tratamiento de agua residual doméstica en un municipio que tenga una población de al menos 39.000 habitantes, esto con el objetivo de obtener un caudal de vertimiento de 13 L/s donde se tenga un ahorro en la tasa retributiva que compense la inversión inicial que se realizó para llevar a cabo el proyecto. Para esto se tuvo en cuenta un factor regional (Fr) de 3 y un valor de tarifa mínima de tasa retributiva (*Tasa Retributiva Por Vertimientos Puntuales*, 2025) de 215,84 (\$/ kg O₂). Por consiguiente, se implementaron las siguientes fórmulas para hallar dicha tasa.

$$Carga\ anual\ \left(\frac{kg\ O_2}{año}\right) = DBO\ \left(\frac{mg\ O_2}{L}\right) * Q\ \left(\frac{L}{año}\right) * 10^{-6} \quad (Ec. 12)$$

$$Tasa\ retributiva\ \left(\frac{\$}{año}\right) = Carga\ anual\ \left(\frac{kg\ O_2}{año}\right) * Tarifa\ mínima\ \left(\frac{\$}{kg\ O_2}\right) * Fr \quad (Ec.13)$$

A continuación, se presentan valores supuestos de la demanda bioquímica de oxígeno (DBO) en una muestra de agua residual doméstica, antes y después de la implementación de la cavitación hidrodinámica rotativa (Ver tabla 9).

Tabla 9

Valores supuestos del parámetro de la DBO.

MUESTRA	DBO (mg O₂/ L)
Inicial	100
Final	6,8

Se compara el comportamiento de la demanda bioquímica de oxígeno donde se evidencia su eficiencia en la reducción de la carga contaminante. Esta disminución contribuye al cumplimiento normativo y genera beneficios económicos al optimizar los costos asociados a la tasa retributiva (Ver tabla10), fortaleciendo la sostenibilidad técnica y financiera del sistema de tratamiento.

Tabla 10

Cálculo ahorro tasa retributiva.

Caudal Vertimiento	13,83	L/s
DBO sin cavitación	43614	kg O ₂ /año
DBO con cavitación	2966	kg O ₂ /año
Ahorro DBO	40649	kg O ₂ /año
FR	3	-
Ahorro tasa retributiva	26320727	\$/año

Se presentan los indicadores financieros del proyecto (Ver tabla 11) donde se evalúa su rentabilidad y viabilidad económica. Estos parámetros permiten determinar si la implementación

del proyecto es financieramente sostenible y si genera beneficios a lo largo del tiempo (Ver apéndice E).

Tabla 11

Indicadores financieros para el proyecto.

TIR (%)	12,05
TMAR (%)	12,0
VPN (\$)	218466
PAYBACK (años)	6

El análisis anterior evidencia que la implementación de la tecnología de cavitación hidrodinámica rotativa en el tratamiento de aguas residuales domésticas es una alternativa eficiente y económicamente viable, dado que la reducción en la carga contaminante (DBO) se refleja en una disminución considerable de los costos asociados al pago de la tasa retributiva, generando flujos de caja positivos para la operación. Los indicadores evaluados respaldan esta viabilidad, ya que la Tasa Interna de Retorno supera ligeramente la Tasa Mínima Atractiva de Retorno, lo que confirma la rentabilidad del proyecto bajo las condiciones establecidas. Asimismo, el Valor Presente Neto positivo refleja que los beneficios económicos superan los costos de inversión, mientras que el periodo de recuperación indica que la inversión puede ser recuperada en un horizonte temporal adecuado, asegurando la sostenibilidad financiera a mediano plazo.

5.4 Análisis del avance tecnológico (TRL)

A continuación, se presenta una tabla que resume las actividades realizadas para avanzar desde TRL 5, correspondiente a la validación en laboratorio, hasta TRL 7, donde la tecnología se demuestra en condiciones operativas reales (Ver tabla 12). El análisis presentado permite

comprender de forma clara la progresión tecnológica alcanzada y su relación directa con las etapas metodológicas y experimentales desarrolladas.

Tabla 12

Actividades realizadas para la maduración tecnológica del proyecto.

Nivel TRL	Objetivo	Actividades
TRL 5 Validación de concepto en laboratorio	Validar el funcionamiento básico de la cavitación hidrodinámica rotativa y definir variables operativas clave.	<ul style="list-style-type: none"> - Identificación de variables críticas: presión, caudal, temperatura, número de ciclos y tiempo de residencia. - Análisis teórico y búsqueda de información científica sobre la tecnología y normativa vigente. - Ajuste inicial del prototipo a nivel laboratorio.
TRL 6 Validación en entorno relevante	Probar el prototipo en condiciones representativas utilizando agua residual doméstica real.	<ul style="list-style-type: none"> - Montaje y ajuste del sistema a escala piloto con circuito cerrado de operación. - Diseño experimental controlado con aguas residuales reales para evaluar la reducción microbiológica (coliformes totales). - Medición de parámetros fisicoquímicos: pH, temperatura y corriente eléctrica. - Determinación de la DBO₅ para cumplir normativa ambiental. - Análisis estadístico para validar la confiabilidad de los resultados.
TRL 7 Demostración en condiciones operativas	Demostrar la viabilidad técnica, económica y ambiental del sistema en operación continua.	<ul style="list-style-type: none"> - Operación continua del prototipo bajo condiciones representativas de una planta de tratamiento. - Evaluación del impacto en la tasa retributiva como indicador económico-ambiental. - Proyección financiera para determinar rentabilidad y sostenibilidad. - Integración de resultados técnicos con análisis económico y cumplimiento normativo.

El desarrollo experimental y la evaluación integral realizada en este proyecto evidencian el avance progresivo de la cavitación hidrodinámica rotativa desde un nivel de madurez

tecnológica TRL 5 hasta TRL 7. En la primera etapa, correspondiente a TRL 5, se logró la validación del concepto en laboratorio mediante la identificación y control de variables operativas críticas como presión, caudal, temperatura, tiempo de residencia y número de ciclos. Posteriormente, la transición a TRL 6 se alcanzó a través de la implementación de un prototipo funcional en un entorno relevante, utilizando agua residual doméstica real y simulando las condiciones de una planta de tratamiento, lo cual permitió evaluar el desempeño técnico y la eficacia en la reducción de contaminantes y microorganismos. Finalmente, la clasificación en TRL 7 se fundamenta en la demostración del sistema en operación continua, integrando no solo el rendimiento técnico, sino también su impacto económico y ambiental mediante la evaluación de la tasa retributiva y la viabilidad financiera. Este proceso confirma que la tecnología se encuentra lista para su escalamiento, ofreciendo una solución innovadora, sostenible y con alto potencial de aplicación en el tratamiento avanzado de aguas residuales domésticas.

6 Conclusiones

Los resultados obtenidos en este estudio evidencian la eficacia de la cavitación hidrodinámica rotativa como tecnología de desinfección terciaria para el tratamiento de aguas residuales domésticas. A través del diseño experimental propuesto, se observaron reducciones logarítmicas progresivas en la concentración bacteriana conforme aumentaba el número de ciclos de tratamiento, alcanzando hasta 7 unidades logarítmicas en los mejores casos. Asimismo, los parámetros fisicoquímicos medidos, como el pH y la temperatura, presentaron incrementos moderados durante el proceso, lo que favoreció la eficiencia de la cavitación en la inactivación microbiana. Además, la evaluación del parámetro DBO₅ según la NTC 4219 permitió cuantificar la disminución de la carga orgánica biodegradable, donde los resultados muestran una notable eficacia del tratamiento, aportando evidencia del impacto positivo de esta tecnología en la compensación ambiental de la tasa retributiva.

La clasificación en TRL 7 implica que la tecnología debe haber sido demostrada como un sistema prototipo funcional en un entorno operativo real o altamente representativo, lo cual fue logrado en el presente estudio mediante la implementación de un reactor de cavitación rotativa a escala piloto, probado con agua residual doméstica real. El sistema fue diseñado, ensamblado y operado bajo condiciones controladas que simulan con alta fidelidad un entorno de aplicación real, incluyendo parámetros como caudal, presión, número de ciclos, temperatura y tiempo de residencia. Estos hallazgos respaldan el avance tecnológico de la cavitación rotativa desde un TRL 5 hacia un TRL 7, demostrando su viabilidad para ser incorporada en esquemas de tratamiento avanzado, en cumplimiento con criterios de eficiencia microbiológica exigidos por la normatividad ambiental.

7 Recomendaciones

Con el fin de consolidar y optimizar el proceso de validación de la tecnología de cavitación hidrodinámica rotativa, se recomienda ampliar el monitoreo de los parámetros fisicoquímicos durante los ensayos experimentales. En particular, se sugiere incorporar la medición de variables adicionales como turbidez, demanda química de oxígeno (DQO), sólidos suspendidos totales (SST) y conductividad eléctrica. Estos parámetros proporcionan información complementaria sobre la calidad del agua tratada y permiten una caracterización más completa de los efectos del tratamiento. El seguimiento de estos indicadores permitiría no solo cuantificar la reducción de contaminantes físicos y químicos, sino también comprender con mayor profundidad los mecanismos involucrados en la desinfección y en la degradación de la materia orgánica.

A fin de continuar con el desarrollo tecnológico del proyecto, se recomienda la sustitución de la bomba actual por un equipo que cumpla con el caudal óptimo requerido para garantizar la operación estable y eficiente del cavitador hidrodinámico rotativo. Esta modificación permitirá optimizar el desempeño del sistema, asegurar la generación adecuada de cavitación y, al mismo tiempo, reducir el consumo energético, favoreciendo la sostenibilidad económica y ambiental del proyecto. Además, la selección de una bomba con características técnicas apropiadas contribuirá a la escalabilidad del proceso, facilitando su implementación a nivel industrial y aumentando la viabilidad financiera de la tecnología, dado que se disminuirán los costos operativos y se mejorará la relación costo-beneficio del tratamiento de aguas residuales domésticas.

Referencias

- AC Ingeniería Virtual. (s. f.). AC Ingeniería Virtual Industria 4.0. <https://www.acingenieriavirtual.com>
- Adriana K.N. Vargas, Calderón, J., Velásquez, D., Castro, M., & Núñez, D. A. (2020). Análisis de los principales sistemas biológicos de tratamiento de aguas residuales domésticas en Colombia. *Ingeniare. Revista Chilena de Ingeniería*, 28(2), 315–322. <https://doi.org/10.4067/s0718-33052020000200315>
- Agarkoti, C., Thanekar, P. D., & Gogate, P. R. (2021). Cavitation based treatment of industrial wastewater: A critical review focusing on mechanisms, design aspects, operating conditions and application to real effluents. *Journal of Environmental Management*, 300, 113786. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113786>
- 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.
- Andrés, S., Rangel, L., & Ambiental, I. (2017). Evaluación de la eficiencia de los sistemas de tratamiento de aguas residuales en la Provincia Comunera, Santander-Colombia. Universidad Libre. <https://repository.unilibre.edu.co/bitstream/handle/10901/20306/CD%20EGA%202017%200002%20%20Trabajo%20de%20grado.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Bagal, M. V., & Gogate, P. R. (2014). Wastewater treatment using hybrid techniques based on cavitation and Fenton chemistry: A review. *Ultrasonics Sonochemistry*, 21(1), 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2013.07.009>
- Bandh, S. A., & Mushtaq, B. (2025). Water and wastewater treatment technologies. In *Springer Water* (pp. 67–163). https://doi.org/10.1007/978-3-031-86684-5_2
- Bhat, A. P., & Gogate, P. R. (2020). Cavitation-based pre-treatment of wastewater and waste sludge for improvement in the performance of biological processes: A review. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(2), 104743–104743. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.104743>
- Bustos, A., Pulido, E., & Rivera, M. (2023). Tratamiento de aguas residuales en Colombia y sistemas bioelectroquímicos: Usos y perspectivas. *Tecnura*, 27(76), 111–143. <https://doi.org/10.14483/22487638.19390>

- Chand, R., Bremner, D. H., Namkung, K. C., Collier, P. J., & Gogate, P. R. (2007). Water disinfection using the novel approach of ozone and a liquid whistle reactor. *Biochemical Engineering Journal*, 35, 357.
- Chaudhuri, J. H., & Chatterjee, D. (2024). Modelling of chemical kinetics in the presence of hydrodynamic cavitation for wastewater treatment applications. *Chemical Engineering Science*, 295, 120167. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2024.120167>
- Congreso de la República de Colombia. (1997). Ley 373 de 1997. Diario Oficial, n.º 43091. <https://archivo.minambiente.gov.co>
- Congreso de la República de Colombia. (2009). Ley 1333 de 2009. Diario Oficial, n.º 47427. <https://archivo.minambiente.gov.co>
- Debem. (2025). La cavitación en las bombas centrífugas. <https://www.debem.com/es/la-cavitacion-en-las-bombas-centrifugas/>
- ECORFAN. (2023). Producción de biodiesel por cavitación hidrodinámica. https://www.ecorfan.org/bolivia/researchjournals/Sistemas_Experimentales/vol3num9/Revista_de_Sistemas_Experimentales_V3_N9_3.pdf
- Gestor Normativo de la CRA - Resolución 372 de 1998 MMA. (2021). Cra.gov.co. https://normas.cra.gov.co/gestor/docs/resolucion_minambiente_rma37298.htm
- Gogate, P. R. (2007). Application of cavitation reactors for water disinfection: Current status and path forward. *Journal of Environmental Management*, 85(4), 801–815. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2007.07.001>
- Gogate, P. R., & Pandit, A. B. (2011). A review of imperative technologies for wastewater treatment I: Oxidation technologies at ambient conditions. *Advances in Environmental Research*, 8(3–4), 501–551. [https://doi.org/10.1016/S1093-0191\(03\)00032-7](https://doi.org/10.1016/S1093-0191(03)00032-7)
- Gutiérrez-Mosquera, L. F., Arias-Giraldo, S., & Cardona-Naranjo, D. F. (2019). Cavitación hidrodinámica: Un enfoque desde la ingeniería y la agroindustria. *Scientia et Technica*, 24(2), 283. <https://doi.org/10.22517/23447214.19921>
- ICONTEC. (2008). NTC 4219: Calidad del agua. Determinación de la demanda bioquímica de oxígeno después de cinco días (DBO5). Método de ensayo. Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación.

- Jain, P., Bhandari, V. M., Balapure, K., Jena, J., Ranade, V. V., & Killedar, D. J. (2019). Hydrodynamic cavitation using vortex diode: An efficient approach for elimination of pathogenic bacteria from water. *Journal of Environmental Management*, 242, 210–219. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.04.057>
- Jorge. (2020, diciembre 15). El proceso de tratamiento de aguas residuales y eliminación de contaminantes emergentes. *iAgua*. <https://www.iagua.es/blogs/lander-rodriguez-jorge/proceso-tratamiento-aguas-residuales-y-eliminacion-contaminantes>
- Jyoti, K., & Pandit, A. B. (2004). Hybrid cavitation methods for water disinfection: Simultaneous use of chemicals with cavitation. *Ultrasonics Sonochemistry*, 11(6), 393–399. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2004.03.007>
- María, M., & Arturo, C. (2023). Diseño de un cavitador hidrodinámico a escala planta piloto. Universidad del Valle. <https://bibliotecadigital.univalle.edu.co/entities/publication/470a7238-1840-4c0f-add8-fc70b5ca1514>
- Metcalf & Eddy, Inc., Tchobanoglous, G., Burton, F. L., & Stensel, H. D. (2014). *Wastewater engineering: Treatment and resource recovery* (5th ed.). McGraw-Hill Education.
- Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural. (1984). Decreto 1594 de 1984. *Diario Oficial*, n.º 36700. <https://archivo.minambiente.gov.co>
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2015a). Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible (Decreto 1076). *Diario Oficial*, n.º 49523. <https://archivo.minambiente.gov.co>
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2015b). Resolución 0631 de 2015. *Diario Oficial*, n.º 49523. <https://archivo.minambiente.gov.co>
- Noria Latín América. (2023). La cavitación explicada e ilustrada. <https://noria.mx/lube-learn/lubricacion-maquinaria-lube-learn/certificacion-mltii/la-cavitacion-explicada-e-ilustrada/>
- Panchal, D., & Pandit, A. B. (2021). A review on cavitation applications for food and wastewater processing. *Ultrasonics Sonochemistry*, 70, 105293. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2020.105293>

- Patil, P. N., & Pandit, A. B. (2007). Cavitation-based water disinfection: Effect of operating parameters and intensification using additives. *Ultrasonics Sonochemistry*, 14(6), 567–578. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2006.10.009>
- Redalyc. (2019). Cavitación hidrodinámica: Un enfoque desde la ingeniería. <https://www.redalyc.org/journal/849/84961237015/movil/>
- Resolución 3957 de 2009. Secretaría Distrital de Ambiente. (2020). [Alcaldiabogota.gov.co. https://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?dt=S&i=37051](https://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?dt=S&i=37051)
- Romero Rojas, J. A. (2004). Tratamiento de aguas residuales: Teoría y principio de diseño (3.^a ed.). Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. <https://www-digitaliapublishing-com.bibliotecavirtual.uis.edu.co/a/127822>
- Song, Y., Hou, R., Zhang, W., & Liu, J. (2022). Hydrodynamic cavitation as an efficient water treatment method for various sewage: A review. *Water Science & Technology*, 86(2), 302–320. <https://doi.org/10.2166/wst.2022.201>
- Sun, X., Wang, Z., Xuan, X., Ji, L., Li, X., Tao, Y., Boczka, G., Zhao, S., Yoon, J. Y., & Chen, S. (2021). Disinfection characteristics of an advanced rotational hydrodynamic cavitation reactor in pilot scale. *Ultrasonics Sonochemistry*, 73, 105543. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2021.105543>
- Sun, X., Xuan, X., Song, Y., Jia, X., Ji, L., Zhao, S., Yoon, J. Y., Chen, S., Liu, J., & Wang, G. (2020). Experimental and numerical studies on the cavitation in an advanced rotational hydrodynamic cavitation reactor for water treatment. *Ultrasonics Sonochemistry*, 70, 105311. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2020.105311>
- Tasa Retributiva por Vertimientos Puntuales -. (2025, March 7). [Minambiente.gov.co. https://www.minambiente.gov.co/negocios-verdes/tasa-retributiva-por-vertimientos-puntuales/#1730130118581-06538942-8f27](https://www.minambiente.gov.co/negocios-verdes/tasa-retributiva-por-vertimientos-puntuales/#1730130118581-06538942-8f27)
- Technology Readiness Assessment Best Practices Guide. (s. f.). NASA. <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20205003605/downloads/%20SP-20205003605%20TRA%20BP%20Guide%20FINAL.pdf>

Apéndices

Apéndice A. Agentes infecciosos potencialmente presentes en aguas residuales domésticas no tratadas

Figura 9

Organismos patógenos del agua residual

Tabla 9.3
Organismos patógenos del agua residual⁽⁶⁰⁾

Organismos	Enfermedad	Sintomatología
BACTERIAS		
<i>Escherichia coli</i> (enteropatógena)	Gastroenteritis	Diarrea
<i>Legionella pneumophila</i>	Legionelosis	Enfermedad respiratoria aguda
<i>Leptospira</i> (150 spp)	Leptospirosis	Ictericia, fiebre
<i>Salmonella typhi</i>	Fiebre tifoidea	Fiebre, diarrea, úlceras
<i>Salmonella</i> (>1.700 spp)	Salmonelosis	Envenenamiento
<i>Shigella</i> (4 spp)		Disentería
<i>Vibrio cholerae</i>	Cólera	Diarrea, deshidratación
<i>Yersinia enterocolitica</i>	Yersinosis	Diarrea
VIRUS		
Adenovirus (31 tipos)	Enfermedad respiratoria	
Enterovirus (67 tipos)	Gastroenteritis	
Polio (3 tipos)	Poliomielitis, meningitis	Fiebre
Coxsackie A (24 tipos)	Herpangina, meningitis	Fiebre
Coxsackie B (6 tipos)	Anomalias cardíacas, meningitis	Fiebre
Echo (34 tipos)	Meningitis, enfermedades respiratorias	
Hepatitis A	Hepatitis infecciosa	Ictericia, fiebre
Agente Norwalk	Gastroenteritis	Vómito y diarrea
Reo (3 tipos)	Gastroenteritis	
Rota	Gastroenteritis	Vómito y diarrea
PROTOZOOS		
<i>Balantidium coli</i>	Balantidiasis	Diarrea
<i>Cryptosporidium</i>	Criptosporidiosis	Diarrea
<i>Entamoeba histolytica</i>	Amibiasis	Diarrea
<i>Giardia lamblia</i>	Giardiasis	Diarrea, náusea, indigestión
NEMATODOS		
<i>Ascaris lumbricoides</i>	Ascariasis	Lombrices
<i>Enterobius vericularis</i>	Enterobiasis	Oxiuros
<i>Fasciola hepática</i>	Fascioliasis	Lombriz del hígado
PLATELMINTOS		
<i>Hymenolepis nana</i>	Himenolepiasis	Tenia enana
<i>Taenia saginata</i>	Teniasis	Tenia vacuna
<i>Taenia solium</i>	Teniasis	Tenia del cerdo
<i>Trichuris trichiura</i>	Tricuriasis	

Figura 10*Organismos indicadores de contaminación*

Tabla 9.4
Organismos indicadores de contaminación

Organismo indicador	Características
Coliformes	Bacterias bacilares gram negativas que fermentan la lactosa con producción de gas en 48 h a $35 \pm 0,5^{\circ}\text{C}$. Existen cepas que no conforman con la definición. Incluyen cuatro géneros: <i>Escherichia</i> , <i>Klebsiella</i> , <i>Citrobacter</i> y <i>Enterobacter</i> . El género <i>Escherichia</i> es el más representativo de contaminación fecal.
Coliformes fecales	Bacterias coliformes que producen gas a $44,5^{\circ}\text{C}$ en 24 ± 2 h.
<i>Klebsiella</i>	Bacteria coliforme termotolerante que se cultiva a $35 \pm 0,5^{\circ}\text{C}$ durante 24 ± 2 h.
<i>Escherichia coli</i>	Bacteria coliforme representativa de origen fecal. Constituye los coliformes fecales. Es el indicador fecal por excelencia
Estreptococos fecales	Grupo indicador de contaminación fecal. Su número puede, en ocasiones, ser mayor que el de los coliformes. Por lo general son menos abundantes porque mueren rápidamente fuera del huésped. Su presencia en el agua es indicadora de contaminación reciente. Los enterococos <i>S. faecalis</i> y <i>S. faecium</i> son miembros específicamente de origen humano, del grupo de los estreptococos fecales. Se encuentran en menor número que otros organismos indicadores, pero exhiben una supervivencia mejor en aguas de mar.
<i>Clostridium perfringens</i>	Bacteria anaerobia esporuladora, lo cual le permite existir indefinidamente en el agua. Indicador deseable en aguas desinfectadas, en aguas de contaminación añeja o cuando no se analiza la muestra con prontitud.

Apéndice B. Resultados datos pruebas experimentales

Figura 11

Resultados de las pruebas experimentales.

CODIGO MUESTRA	FECHA	VOLUMEN MUESTRA (mL)	NUMERO CICLOS	CRECIMIENTO BACTERIANO EN DILUCIÓN							
				SD	1,00E+01	1,00E+02	1,00E+03	1,00E+04	1,00E+05	1,00E+06	1,00E+07
E1-Np0-R1	6/05/2025	1	0						44	54	39
E1-Np0-R2	6/05/2025	1	0						38	50	38
E1-Np442-R1	6/05/2025	1	442				37	8	1	1	0
E1-Np442-R2	6/05/2025	1	442				30	6	1	0	0
E1-Np885-R1	6/05/2025	1	885	10	0	0	0	0	0	0	0
E1-Np885-R2	6/05/2025	1	885	0	0	0	0	0	0	0	0
E2-Np0-R1	8/05/2025	1	0						75	52	40
E2-Np0-R2	8/05/2025	1	0						59	42	37
E2-Np442-R1	8/05/2025	1	442			18	3	3	1	1	0
E2-Np442-R2	8/05/2025	1	442			13	3	0	0	0	0
E2-Np885-R1	8/05/2025	1	885	10	2	0	0	0	0	0	0
E2-Np885-R2	8/05/2025	1	885	8	1	0	0	0	0	0	0
E3-Np0-R1	5/06/2025	1	0							91	18
E3-Np0-R2	5/06/2025	1	0							109	20
E3-Np442-R1	5/06/2025	1	442					28	8	5	1
E3-Np442-R2	5/06/2025	1	442					24	5	3	1
E3-Np885-R1	5/06/2025	1	885	0	3	10	36	10	12	19	4
E3-Np885-R2	5/06/2025	1	885	1	2	6	23	9	11	14	1
E4-Np0-R1	12/06/2025	1	0					122	32	4	1
E4-Np0-R2	12/06/2025	1	0					128	28	2	0
E4-Np442-R1	12/06/2025	1	442				21	12	1	0	0
E4-Np442-R2	12/06/2025	1	442				16	5	0	0	0
E4-Np885-R1	12/06/2025	1	885	18	15	1	1	0	0	0	0
E4-Np885-R2	12/06/2025	1	885	10	1	1	0	0	0	0	0

Figura 12

Continuación tabla de resultados de las pruebas experimentales.

CODIGO MUESTRA	FECHA	VOLUMEN MUESTRA (mL)	NUMERO CICLOS	CONCENTRACION (UFC/mL)								Col PROM	UFC/mL	DESV STAND	C/Co	LR
				SD	1,00E+01	1,00E+02	1,00E+03	1,00E+04	1,00E+05	1,00E+06	1,00E+07					
E1-Np0-R1	6/05/2025	1	0						4,40E+06	5,40E+07	3,90E+08	38,50	3,85E+08	7,07E+06	1,00E+00	0
E1-Np0-R2	6/05/2025	1	0						3,80E+06	5,00E+07	3,80E+08	33,50	3,35E+04	4,95E+03	8,70E-05	4
E1-Np442-R1	6/05/2025	1	442				3,70E+04	8,00E+04	1,00E+05	1,00E+06	0,00E+00	5,00	5,00E+01	7,07E+01	1,30E-07	7
E1-Np442-R2	6/05/2025	1	442				3,00E+04	6,00E+04	1,00E+05	0,00E+00	0,00E+00	38,50	3,85E+08	2,12E+07	1,00E+00	0
E1-Np885-R1	6/05/2025	1	885	1,00E+02	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	15,50	1,55E+03	3,54E+02	4,03E-06	5
E1-Np885-R2	6/05/2025	1	885	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	9,00	9,00E+01	1,41E+01	2,34E-07	7
E2-Np0-R1	8/05/2025	1	0						7,50E+06	5,20E+07	4,00E+08	19,00	1,90E+08	1,41E+07	1,00E+00	0
E2-Np0-R2	8/05/2025	1	0						5,90E+06	4,20E+07	3,70E+08	26,00	2,60E+05	2,83E+04	1,37E-03	3
E2-Np442-R1	8/05/2025	1	442			1,80E+03	3,00E+03	3,00E+04	1,00E+05	1,00E+06	0,00E+00	29,50	2,95E+04	9,19E+03	1,55E-04	4
E2-Np442-R2	8/05/2025	1	442			1,30E+03	3,00E+03	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	30,00	3,00E+06	2,83E+05	1,00E+00	0
E2-Np885-R1	8/05/2025	1	885	1,00E+02	2,00E+01	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	18,50	1,85E+04	3,54E+03	6,17E-03	2
E2-Np885-R2	8/05/2025	1	885	8,00E+01	1,00E+01	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	14,00	1,40E+02	5,66E+01	4,67E-05	4
E3-Np0-R1	5/06/2025	1	0						9,10E+07	1,80E+08						
E3-Np0-R2	5/06/2025	1	0						1,09E+08	2,00E+08						
E3-Np442-R1	5/06/2025	1	442					2,80E+05	8,00E+05	5,00E+06	1,00E+07					
E3-Np442-R2	5/06/2025	1	442					2,40E+05	5,00E+05	3,00E+06	1,00E+07					
E3-Np885-R1	5/06/2025	1	885	0,00E+00	3,00E+01	1,00E+03	3,80E+04	1,00E+05	1,20E+06	1,90E+07	4,00E+07					
E3-Np885-R2	5/06/2025	1	885	1,00E+01	2,00E+01	6,00E+02	2,30E+04	9,00E+04	1,10E+06	1,40E+07	1,00E+07					
E4-Np0-R1	12/06/2025	1	0						1,22E+06	3,20E+06	4,00E+06	30,00	3,00E+06	2,83E+05	1,00E+00	0
E4-Np0-R2	12/06/2025	1	0						1,28E+06	2,80E+06	2,00E+06	30,00	3,00E+06	2,83E+05	1,00E+00	0
E4-Np442-R1	12/06/2025	1	442				2,10E+04	1,20E+05	1,00E+05	0,00E+00	0,00E+00	18,50	1,85E+04	3,54E+03	6,17E-03	2
E4-Np442-R2	12/06/2025	1	442				1,60E+04	5,00E+04	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	14,00	1,40E+02	5,66E+01	4,67E-05	4
E4-Np885-R1	12/06/2025	1	885	1,80E+02	1,50E+02	1,00E+02	1,00E+03	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00					
E4-Np885-R2	12/06/2025	1	885	1,00E+02	1,00E+01	1,00E+02	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00					

Apéndice C. Prueba de normalidad y lognormalidad.

Figura 13

Prueba de normalidad y lognormalidad en el software GraphPad - Prism.

The screenshot shows the 'Normality and Lognormality Tests' window in GraphPad Prism. The results are summarized in the following table:

Test	0	442	885
Test for normal distribution			
D'Agostino & Pearson test			
K2	1.962	17.29	6.258
P value	0.3749	0.0002	0.0438
Passed normality test (alpha=0.05)?	Yes	No	No
P value summary	ns	***	*
Anderson-Darling test			
A2*	0.6220	1.536	1.587
P value	0.0668	0.0002	0.0001
Passed normality test (alpha=0.05)?	Yes	No	No
P value summary	ns	***	***
Shapiro-Wilk test			
W	0.8207	0.5908	0.6106
P value	0.0475	0.0001	0.0002
Passed normality test (alpha=0.05)?	No	No	No
P value summary	*	***	***
Kolmogorov-Smirnov test			
KS distance	0.2766	0.3997	0.4475
P value	0.0721	0.0004	<0.0001
Passed normality test (alpha=0.05)?	Yes	No	No
P value summary	ns	***	****
Number of values	8	8	8

Figura 14

Prueba de normalidad y lognormalidad en el software Python.

```
#Prueba de normalidad
from scipy.stats import anderson

# Datos por número de ciclos
datos_ciclos_0 = [8591, 8580, 8602, 8568, 8255, 8301, 6505, 6447]
datos_ciclos_442 = [4568, 4477, 3255, 3114, 5447, 5380, 4322, 4204]
datos_ciclos_885 = [2000, 2000, 2000, 1903, 4556, 4362, 2255, 2000]

# Función para aplicar prueba Anderson-Darling
def prueba_anderson(data, label):
    result = anderson(data, dist='norm')
    print(f"\n--- Resultados para {label} ---")
    print(f"Estadístico: {result.statistic}")
    for i in range(len(result.critical_values)):
        sl, cv = result.significance_level[i], result.critical_values[i]
        if result.statistic < cv:
            print(f"Para nivel de significancia {sl}%, no se rechaza H0 (Normal)")
        else:
            print(f"Para nivel de significancia {sl}%, se rechaza H0 (No normal)")

# Pruebas
prueba_anderson(datos_ciclos_0, "Número de ciclos = 0")
prueba_anderson(datos_ciclos_442, "Número de ciclos = 442")
prueba_anderson(datos_ciclos_885, "Número de ciclos = 885")
```

Figura 15

Resultados de la prueba de normalidad y lognormalidad en el software Python.

```

--- Resultados para Número de ciclos = 0 ---
Estadístico: 1.254976543044286
Para nivel de significancia 15.0%, se rechaza H0 (No normal)
Para nivel de significancia 10.0%, se rechaza H0 (No normal)
Para nivel de significancia 5.0%, se rechaza H0 (No normal)
Para nivel de significancia 2.5%, se rechaza H0 (No normal)
Para nivel de significancia 1.0%, se rechaza H0 (No normal)

--- Resultados para Número de ciclos = 442 ---
Estadístico: 0.3303276084433939
Para nivel de significancia 15.0%, no se rechaza H0 (Normal)
Para nivel de significancia 10.0%, no se rechaza H0 (Normal)
Para nivel de significancia 5.0%, no se rechaza H0 (Normal)
Para nivel de significancia 2.5%, no se rechaza H0 (Normal)
Para nivel de significancia 1.0%, no se rechaza H0 (Normal)

--- Resultados para Número de ciclos = 885 ---
Estadístico: 1.4395336055929668
Para nivel de significancia 15.0%, se rechaza H0 (No normal)
Para nivel de significancia 10.0%, se rechaza H0 (No normal)
Para nivel de significancia 5.0%, se rechaza H0 (No normal)
Para nivel de significancia 2.5%, se rechaza H0 (No normal)
Para nivel de significancia 1.0%, se rechaza H0 (No normal)

```

Apéndice D. Prueba de Kruskal-Wallis y Prueba de Dunn con corrección de Bonferroni

La Prueba de Kruskal-Wallis se aplica para evaluar si existen diferencias significativas entre las medianas de tres o más grupos independientes.

• 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.

Figura 16

Prueba de Kruskal-Wallis en el software GraphPad – Prism.

Kruskal-Wallis test						
Multiple comparisons						
1	Number of families	1				
2	Number of comparisons per family	3				
3	Alpha	0.05				
4						
5	Dunn's multiple comparisons test	Mean rank diff.	Significant?	Summary	Adjusted P Value	
6	0 vs. 442	9.125	Yes	*	0.0294	A-B
7	0 vs. 885	14.88	Yes	****	<0.0001	A-C
8	442 vs. 885	5.750	No	ns	0.3107	B-C
9						
10	Test details	Mean rank 1	Mean rank 2	Mean rank diff.	n1	n2
11	0 vs. 442	20.50	11.38	9.125	8	8
12	0 vs. 885	20.50	5.625	14.88	8	8
13	442 vs. 885	11.38	5.625	5.750	8	8
14						
15	Compact letter display					
16	0	A				
17	442	B				
18	885	B				
19						
20						
21						
22						
23						
24						
25						
26						
27						
28						
29						
30						

Figura 17

Prueba de Kruskal-Wallis en el software Python.

```
import numpy as np
from scipy import stats
# Datos transformados en log10, agrupados por ciclo

ciclo0 = [8.591, 8.580, 8.602, 8.568, 8.255, 8.301, 6.505, 6.447]
ciclo442 = [4.568, 4.477, 3.255, 3.114, 5.447, 5.380, 4.322, 4.204]
ciclo885 = [2.000, 0.000, 2.000, 1.903, 4.556, 4.362, 2.255, 2.000] # Nota: el 0.000 es por el reemplazo

# Realizar prueba de Kruskal-Wallis
h_stat, p_value = stats.kruskal(ciclo0, ciclo442, ciclo885)
print(f"Estadístico H: {h_stat}")
print(f"Valor p: {p_value}")

Estadístico H: 18.03636759581881
Valor p: 0.00012118602479984289
```

Figura 18

Prueba de Dunn con corrección de Bonferroni en el software Python.

```
import numpy as np
from scipy import stats
import scikit_posthocs as sp
import pandas as pd

# Datos transformados en log10, agrupados por ciclo
ciclo0 = [8.591, 8.580, 8.602, 8.568, 8.255, 8.301, 6.505, 6.447]
ciclo442 = [4.568, 4.477, 3.255, 3.114, 5.447, 5.380, 4.322, 4.204]
ciclo885 = [2.000, 0.000, 2.000, 1.903, 4.556, 4.362, 2.255, 2.000]

# 1. Crear DataFrame estructurado
data = {
    'Concentracion': ciclo0 + ciclo442 + ciclo885,
    'Ciclo': ['0']*len(ciclo0) + ['442']*len(ciclo442) + ['885']*len(ciclo885)
}
df = pd.DataFrame(data)

# 2. Realizar prueba de Dunn con corrección Bonferroni
dunn_results = sp.posthoc_dunn(
    df,
    val_col='Concentracion',
    group_col='Ciclo',
    p_adjust='bonferroni'
)

print("Resultados Prueba de Dunn (matriz de p-values):")
print(dunn_results)

# 3. Interpretación clara
print("\nInterpretación de comparaciones por pares:")
comparisons = {
    ('0', '442'): "Ciclo 0 vs Ciclo 442",
    ('0', '885'): "Ciclo 0 vs Ciclo 885",
    ('442', '885'): "Ciclo 442 vs Ciclo 885"
}
```

Figura 19

Continuación de la Prueba de Dunn con corrección de Bonferroni en el software Python.

```
for (g1, g2), label in comparisons.items():
    p_val = dunn_results.loc[g1, g2]
    significance = "SIGNIFICATIVO" if p_val < 0.05 else "no significativo"

    # Calcular medianas para dirección
    median1 = np.median(df[df['Ciclo'] == g1]['Concentracion'])
    median2 = np.median(df[df['Ciclo'] == g2]['Concentracion'])

    print(f"\n{label}:")
    print(f"  p-value = {p_val:.6f} ({significance})")
    print(f"  Mediana {g1}: {median1:.2f} vs Mediana {g2}: {median2:.2f}")
    print(f"  Diferencia: {median1 - median2:.2f} unidades log10")
```

Figura 20

Resultados de la Prueba de Dunn con corrección de Bonferroni en el software Python.

Resultados Prueba de Dunn (matriz de p-values):

	0	442	885
0	1.000000	0.029368	0.000076
442	0.029368	1.000000	0.310726
885	0.000076	0.310726	1.000000

Interpretación de comparaciones por pares:

Ciclo 0 vs Ciclo 442:

p-value = 0.029368 (SIGNIFICATIVO)

Mediana 0: 8.43 vs Mediana 442: 4.40

Diferencia: 4.04 unidades log10

Ciclo 0 vs Ciclo 885:

p-value = 0.000076 (SIGNIFICATIVO)

Mediana 0: 8.43 vs Mediana 885: 2.00

Diferencia: 6.43 unidades log10

Ciclo 442 vs Ciclo 885:

p-value = 0.310726 (no significativo)

Mediana 442: 4.40 vs Mediana 885: 2.00

Diferencia: 2.40 unidades log10

Apéndice E Análisis Financiero y Cálculos Tasa Retributiva

Figura 21

Inversión y Operación del proyecto.

Concepto	Inversión		Operación										Liquidación	
	Año 0	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5	Año 6	Año 7	Año 8	Año 9	Año 10	Año 11		
Proyección		4%		4%		4%		4%		4%		4%		4%
Inversión	Obra civil	\$ 5.325.000												
Inversión	Cavitador + Estructura	\$ 30.800.000												
Inversión	Logística	\$ 7.559.000												
Inversión	Estudios preinversión	\$ 22.000.000												
Inversión	Electrónica	\$ 42.650.000												
Costo Gasto	Depreciación (sólo activos fijos)		\$ 7.345.000	\$ 7.345.000	\$ 7.345.000	\$ 7.345.000	\$ 7.345.000	\$ 7.345.000	\$ 7.345.000	\$ 7.345.000	\$ 7.345.000	\$ 7.345.000	\$ 7.345.000	\$ 7.345.000
Costo Gasto	Mantenimiento		\$ 4.800.000	\$ 4.800.000	\$ 4.800.000	\$ 4.800.000	\$ 4.800.000	\$ 4.800.000	\$ 4.800.000	\$ 4.800.000	\$ 4.800.000	\$ 4.800.000	\$ 4.800.000	\$ 4.800.000
Ingreso	Ahorro tasa retributiva		\$ 26.320.727	\$ 26.320.727	\$ 26.320.727	\$ 26.320.727	\$ 26.320.727	\$ 26.320.727	\$ 26.320.727	\$ 26.320.727	\$ 26.320.727	\$ 26.320.727	\$ 26.320.727	\$ 26.320.727

Figura 22

Cálculo de la depreciación de activos fijos.

Valor de los activos	\$ 73.450.000	\$ 66.105.000	\$ 58.760.000	\$ 51.415.000	\$ 44.070.000	\$ 36.725.000	\$ 29.380.000	\$ 22.035.000	\$ 14.690.000	\$ 7.345.000	\$ -	\$ 10.000.000
Depreciación (10% anual)	\$ -	\$ 7.345.000	\$ 7.345.000	\$ 7.345.000	\$ 7.345.000	\$ 7.345.000	\$ 7.345.000	\$ 7.345.000	\$ 7.345.000	\$ 7.345.000	\$ 7.345.000	\$ 7.345.000

Figura 23

Modelo de construcción del flujo de caja.

+INGRESOS	\$ -	\$ 26.320.727	\$ 26.320.727	\$ 26.320.727	\$ 26.320.727	\$ 26.320.727	\$ 26.320.727	\$ 26.320.727	\$ 26.320.727	\$ 26.320.727	\$ 26.320.727	\$ 26.320.727	\$ -
-COSTOS Y GASTOS	\$ -	\$ 12.145.000	\$ 12.145.000	\$ 12.145.000	\$ 12.145.000	\$ 12.145.000	\$ 12.145.000	\$ 12.145.000	\$ 12.145.000	\$ 12.145.000	\$ 12.145.000	\$ 12.145.000	\$ -
=UAI	\$ -	\$ 14.175.727	\$ 14.175.727	\$ 14.175.727	\$ 14.175.727	\$ 14.175.727	\$ 14.175.727	\$ 14.175.727	\$ 14.175.727	\$ 14.175.727	\$ 14.175.727	\$ 14.175.727	\$ -
-IMPUESTOS (20%)	\$ -	\$ 2.835.145	\$ 2.835.145	\$ 2.835.145	\$ 2.835.145	\$ 2.835.145	\$ 2.835.145	\$ 2.835.145	\$ 2.835.145	\$ 2.835.145	\$ 2.835.145	\$ 2.835.145	\$ -
=UDI	\$ -	\$ 11.340.582	\$ 11.340.582	\$ 11.340.582	\$ 11.340.582	\$ 11.340.582	\$ 11.340.582	\$ 11.340.582	\$ 11.340.582	\$ 11.340.582	\$ 11.340.582	\$ 11.340.582	\$ -
-RESERVA LEGAL	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
+AMORTIZACIONES/DEPRECIACIONES	\$ -	\$ 7.345.000	\$ 7.345.000	\$ 7.345.000	\$ 7.345.000	\$ 7.345.000	\$ 7.345.000	\$ 7.345.000	\$ 7.345.000	\$ 7.345.000	\$ 7.345.000	\$ 7.345.000	\$ -
=FLUJO PRODUCCIÓN	\$ -	\$ 18.685.582	\$ 18.685.582	\$ 18.685.582	\$ 18.685.582	\$ 18.685.582	\$ 18.685.582	\$ 18.685.582	\$ 18.685.582	\$ 18.685.582	\$ 18.685.582	\$ 18.685.582	\$ -
-INVERSIONES	\$ 108.234.000	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
+DESINVERSIONES	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ 10.000.000
FLUJO DE CAJA NETO (proyecto puro)	-\$ 108.234.000	\$ 18.685.582	\$ 18.685.582	\$ 18.685.582	\$ 18.685.582	\$ 18.685.582	\$ 18.685.582	\$ 18.685.582	\$ 18.685.582	\$ 18.685.582	\$ 18.685.582	\$ 18.685.582	\$ 10.000.000
FLUJO DE CAJA NETO ACUMULADO	-\$ 108.234.000	-\$ 89.548.418	-\$ 70.862.836	-\$ 52.177.254	-\$ 33.491.672	-\$ 14.806.091	\$ 3.879.491	\$ 22.565.073	\$ 41.250.655	\$ 59.936.237	\$ 78.621.819	\$ 88.621.819	\$ 88.621.819
FLUJO DE CAJA NETO (proyecto puro)	-\$ 108,2	\$ 18,7	\$ 18,7	\$ 18,7	\$ 18,7	\$ 18,7	\$ 18,7	\$ 18,7	\$ 18,7	\$ 18,7	\$ 18,7	\$ 18,7	\$ 10,0
TIR=	12,05%												
VPN=	\$ 218.466												
PAYBACK=	5,7924	años											
TASA DE OPORTUNIDAD=	12,0%	la inversión es rentable (precios constantes)											

Figura 24

Cálculo Tasa Retributiva.

		13.83	litros/s	DATOS PTAR		
DBO sin cavitatar		43614.29	kg O ₂ /año	100	mg O ₂ /Litro agua	inicial sin cavitatar
DBO con cavitación		2965.771584	kg O ₂ /año	6.8	mg O ₂ /Litro agua	final con cavitación
Ahorro kg DBO		40648.51642	kg O ₂ /año	93.2%	reducción de DBO	
FR		3	-			
Ahorro	\$	26,320,727.35	\$/año			