

Evaluación de la cavitación en el tratamiento de aguas residuales con fines de reúso agroindustrial para AC Ingeniería Virtual

Jeniffer Katerinne Castro Moreno y Angie Valentina Mesa Ramírez

Trabajo de grado para obtener el título de Ingeniero Químico

Modalidad práctica empresarial

Director

Hernando Guerrero Amaya

PhD. en Electroquímica, Ciencia y Tecnología

Tutor

Helver Crispiniano Álvarez Castro

PhD. en Ingeniería Química

Universidad Industrial de Santander

Facultad de ingenierías Físicoquímicas

Escuela de ingeniería Química

Bucaramanga

2025

### **Dedicatoria**

*Dedico este trabajo con todo mi amor y gratitud a las personas que han sido mi mayor apoyo en este camino.*

*A mis padres, por su presencia constante y su apoyo incondicional. A mi mami, especialmente, por su esfuerzo incansable, por ser mi guía, mi fuerza y el mayor pilar en este proceso; sin ella, este logro no habría sido posible. A mi papi, por sus palabras de aliento y su respaldo firme, que me impulsaron a no rendirme.*

*A mi abuelita, quien ha estado acompañándome desde el inicio de esta travesía. Aunque su salud no le ha permitido estar tan presente en esta etapa final, su amor, su ejemplo y sus palabras de aliento me han dado aún más fuerza para continuar. A mis hermanos, por animarme, motivarme y recordarme con su cariño que siempre vale la pena seguir adelante.*

*A mis mejores amigos, por ser el refugio en los días difíciles, por escucharme sin juzgar, por sus palabras que siempre levantaron mi ánimo, su infinita paciencia y por no soltar mi mano cuando más los necesité.*

*Y a mis demás familiares, por sus palabras, sus buenos deseos y por creer en mí. Este logro también es de ustedes.*

**JENIFFER KATERINNE CASTRO MORENO**

*Quiero agradecer a todas aquellas personas que han sido mi apoyo incondicional, mi fuerza y mi motivación durante todo este camino.*

*A mi papá, que, aunque ya no esté físicamente, siempre estará presente en mi corazón, guiándome y dándome fuerzas en cada paso que doy, su apoyo y sus enseñanzas fueron mi impulso para nunca rendirme. A mi mamá, cuya valentía y dedicación son mi mayor fuente de inspiración. Su amor, paciencia y su apoyo incondicional fueron fundamentales en este proceso. A mis hermanas, por estar a mi lado en cada paso y por demostrarme, con su cariño, que siempre puedo contar con ellas.*

*A mis abuelos, en especial a mi abuelita, por ser mi guía, fortaleza y por acompañarme con su cariño y sabiduría en cada paso de este camino.*

*A mis amigos, quienes me brindaron su apoyo y ánimo en los momentos difíciles. Cada palabra de aliento, cada momento compartido, hizo que este camino fuera más llevadero.*

*Cada uno de ustedes fue parte esencial de este logro. Gracias a todos por su amor, paciencia, y por ser parte esencial de mi camino.*

**ANGIE VALENTINA MESA RAMÍREZ**

### **Agradecimientos**

Deseamos expresar nuestro más sincero agradecimiento al Ph.D. Hernando Guerrero Amaya por su invaluable colaboración, orientación y permanente disposición a lo largo del desarrollo de este proyecto. Su apoyo fue fundamental para el fortalecimiento académico y científico de esta investigación.

Extendemos también un especial agradecimiento a la empresa A.C. Ingeniería Virtual, en cabeza del Ph.D. Helver Crispiniano Álvarez, por brindarnos la oportunidad de ejecutar este estudio en un entorno propicio para la innovación tecnológica y el aprendizaje práctico. Agradecemos profundamente al Ingeniero Freddy Alexander Jara, cuya asesoría técnica, compromiso y consejos han enriquecido de manera significativa los resultados y el enfoque de este trabajo.

De igual manera, expresamos nuestra sincera gratitud a la Bacterióloga María Angélica Moreno, por su acompañamiento constante, su disposición y por responder con amabilidad y precisión cada una de nuestras inquietudes durante el desarrollo de las pruebas experimentales.

Asimismo, agradecemos al equipo del programa de innovación del SENA – Red Tecnoparque, y a todas las personas que, de manera directa o indirecta, aportaron su conocimiento, experiencia y apoyo durante la realización de este trabajo.

Este proyecto no habría sido posible sin la colaboración de cada uno de ustedes. A todos, nuestro más profundo agradecimiento.

## Tabla de contenido

	<b>Pág.</b>
Introducción .....	13
1. Objetivos .....	14
1.1 Objetivo general .....	14
1.2 Objetivos específicos .....	14
2 Marco teórico .....	15
2.1 Aguas residuales industriales y su reúso .....	15
2.2 Caracterización de aguas residuales industriales .....	15
2.3 Tecnologías de Tratamiento para el Reúso Agrícola .....	16
2.4 Dimensiones de la Calidad del Agua para Reúso .....	17
2.5 Caracterización y Tratamiento de Aguas .....	17
2.6 Normativa.....	18
2.7 Cavitación Hidrodinámica.....	18
3 Estado del arte .....	19
4 Metodología .....	21
4.1 Revisión bibliográfica sobre la tecnología ARCHR (Advanced Rotational Cavitation Hydrodynamic Reactor), orientada a comprender sus principios de funcionamiento y sus aplicaciones en el tratamiento de aguas residuales.....	21
4.2 Recolección de muestras de agua residual provenientes de la empresa productora de pan .....	22
4.3 Identificación y caracterización del agua residual industrial proveniente de la industria panificadora.....	22
4.4 Pruebas exploratorias .....	23
4.5 Caracterización del sistema, ejecución de ensayos experimentales y análisis microbiológico de las muestras de agua residual .....	24
4.5.1 Montaje de los sistemas de cavitación hidrodinámica rotativa y cavitación hidrodinámica estática.....	24
4.6 Planteamiento del diseño experimental.....	26

4.7 Pruebas experimentales reales con el diseño experimental seleccionado y análisis microbiológico .....	26
4.8 Determinación de variables del proceso y elección de la variable de respuesta más adecuada frente a los valores operativos .....	28
4.8.1 Análisis microbiológico de las pruebas experimentales reales.....	30
5 Resultados y análisis.....	31
5.1 Revisión bibliográfica sobre la tecnología ARCHR (Advanced Rotational Cavitation Hydrodynamic Reactor) 31	
5.1.1 Cavitación Hidrodinámica.....	31
5.1.2 Tecnología ARCHR (Advanced Rotational Cavitation Hydrodynamic Reactor) .....	32
5.2 Análisis por parámetro para cada cavitador .....	34
5.2.1 Temperatura.....	35
5.2.1.1 Cavitador Hidrodinámico Estático.....	35
5.2.1.2 Cavitador Hidrodinámico Rotativo.....	36
5.2.1.3 Comparación entre los dos cavitadores para el parámetro de temperatura.....	36
5.2.2 pH.....	37
5.2.2.1 Cavitador Hidrodinámico Estático.....	37
5.2.2.2 Cavitador Hidrodinámico Rotativo.....	37
5.2.2.3 Comparación entre los dos cavitadores para el parámetro de pH .....	38
5.2.3 Turbidez .....	38
5.2.3.1 Cavitador Hidrodinámico Estático.....	38
5.2.3.2 Cavitador Hidrodinámico Rotativo.....	39
5.2.3.3 Comparación entre los dos cavitadores para el parámetro de Turbidez.....	40
5.2.4 DBO.....	40
5.3 Comparación de los dos cavitadores en el parámetro de la reducción logarítmica .....	41
5.3.1 Análisis de reducción microbiológica y eficiencia de la remoción.....	41
5.3.1.1 Cavitador Hidrodinámico Estático.....	41
5.3.1.2 Cavitador Hidrodinámico Rotativo.....	42
5.4 Evaluación comparativa de cavitación estática y rotativa en la desinfección de aguas residuales de la industria panificadora .....	43
5.5 Evaluación de la Viabilidad del Reúso de Agua Tratada según Parámetros Fisicoquímicos y Microbiológicos .....	45
6 Conclusiones .....	46
7 Recomendaciones .....	48
Referencias bibliográficas.....	50
Apéndice.....	56

## Lista de Figuras

	<b>Pág.</b>
Figura 1: <i>Esquema metodológico</i> .....	21
Figura 2. <i>Esquema del sistema de cavitación hidrodinámica rotativa</i> .....	25
Figura 3. <i>Esquema del sistema de cavitación hidrodinámica estática</i> .....	25
Figura 4. <i>Cavitador hidrodinámico</i> .....	32
Figura 5. <i>Reactor de cavitación hidrodinámica estática</i> .....	34
Figura 6. <i>Reactor de cavitación hidrodinámica rotacional avanzado</i> .....	34
Figura 7. <i>NP VS Temperatura Cavitador Hidrodinámico Estático</i> .....	35
Figura 8. <i>NP VS Temperatura Cavitador Hidrodinámico Rotativo</i> .....	36
Figura 9. <i>NP VS pH en el Cavitador Hidrodinámico Estático</i> .....	37
Figura 10. <i>NP VS pH Cavitador Hidrodinámico Rotativo</i> .....	38
Figura 11. <i>Turbidez Cavitador Hidrodinámico Estático</i> .....	39
Figura 12. <i>Turbidez Cavitador Hidrodinámico Rotativo</i> .....	40
Figura 13. <i>DBO Cavitador Hidrodinámico Estático</i> .....	41
Figura 14. <i>NP VS Reducción logarítmica Cavitador Hidrodinámico Estático</i> .....	42
Figura 15. <i>NP VS Reducción logarítmica Cavitador Hidrodinámico Rotativo</i> .....	43
Figura 16. <i>NP VS Reducción logarítmica en los Cavitadores Hidrodinámicos</i> .....	44
Figura 17. <i>Resultados de las pruebas preliminares realizadas en el Cavitador Hidrodinámico Estático</i> .....	56
Figura 18. <i>Evidencia fotográfica de la prueba preliminar 1 realizada en el Cavitador Hidrodinámico Estático</i> .....	56
Figura 19. <i>Evidencia fotográfica de la prueba preliminar 2 realizada en el Cavitador Hidrodinámico Estático</i> .....	57
Figura 20. <i>Resultados de las pruebas experimentales realizadas en el Cavitador Hidrodinámico Estático</i> .....	61
Figura 21. <i>Resultados de las pruebas experimentales realizadas en el Cavitador Hidrodinámico Rotativo</i> .....	64
Figura 22. <i>Primer filtrado del agua</i> .....	67
Figura 23. <i>Agua con el primer filtrado</i> .....	67

Figura 24. <i>Agua con segundo filtrado</i> .....	67
Figura 25. <i>Agua con el último filtrado</i> .....	67
Figura 26. <i>Carga de los tanques</i> .....	68
Figura 27. <i>Peso KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub></i> .....	68
Figura 28. <i>Peso NaCl</i> .....	68
Figura 29. <i>Salas utilizadas</i> .....	69
Figura 30. <i>Peso CaCl</i> .....	69
Figura 31. <i>Preparación del Agua peptona</i> .....	69
Figura 32. <i>Preparación del Agar</i> .....	69
Figura 33. <i>Peso de la peptona</i> .....	69
Figura 34. <i>Material listo para esterilizar</i> .....	70
Figura 35. <i>Autoclave</i> .....	70
Figura 36. <i>Adición de agua peptona en los tubos</i> .....	70
Figura 37. <i>Homogenización de las diluciones</i> .....	70
Figura 38. <i>Inoculación de muestras</i> .....	70
Figura 39. <i>Siembra en cajas petri con Agar</i> .....	71
Figura 40. <i>Registro del pH</i> .....	71
Figura 41. <i>Registro de la turbidez</i> .....	71
Figura 42. <i>Registro de la temperatura</i> .....	71
Figura 43. <i>Toma de Muestras prueba 5</i> .....	72
Figura 44. <i>Equipo y muestras de DBO</i> .....	72
Figura 45. <i>Toma inicial de DBO</i> .....	72
Figura 46. <i>Toma final de DBO</i> .....	73
Figura 47. <i>Soluciones usadas para la toma de DBO</i> .....	73
Figura 48. <i>Muestra inicial, dilución 10<sup>8</sup></i> .....	73
Figura 49. <i>Muestra intermedia, dilución 10<sup>7</sup></i> .....	73
Figura 50. <i>Muestra final, dilución 10<sup>6</sup></i> .....	73
Figura 51. <i>Muestra inicial, dilución 10<sup>8</sup></i> .....	74
Figura 52. <i>Muestra intermedia, dilución 10<sup>7</sup></i> .....	74
Figura 53. <i>Muestra final, dilución 10<sup>6</sup></i> .....	74
Figura 54. <i>Muestra inicial, dilución 10<sup>7</sup></i> .....	74
Figura 55. <i>Muestra intermedia, dilución 10<sup>6</sup></i> .....	74
Figura 56. <i>Muestra final, dilución 10<sup>4</sup></i> .....	74

Figura 57. <i>Muestra inicial, dilución <math>10^6</math></i> .....	75
Figura 58. <i>Muestra intermedia, dilución <math>10^4</math></i> .....	75
Figura 59. <i>Muestra final, dilución <math>10^3</math></i> .....	75
Figura 60. <i>Muestra inicial, dilución <math>10^8</math></i> .....	75
Figura 61. <i>Muestra intermedia, dilución <math>10^4</math></i> .....	75
Figura 62. <i>Muestra final, dilución <math>10^4</math></i> .....	75
Figura 63. <i>Muestra inicial, dilución <math>10^8</math></i> .....	76
Figura 64. <i>Muestra intermedia, dilución <math>10^5</math></i> .....	76
Figura 65. <i>Muestra final, dilución <math>10^4</math></i> .....	76
Figura 66. <i>Muestra inicial, dilución <math>10^8</math></i> .....	76
Figura 67. <i>Muestra intermedia, dilución <math>10^6</math></i> .....	76
Figura 68. <i>Muestra final, dilución <math>10^4</math></i> .....	76
Figura 69. <i>Muestra inicial, dilución <math>10^6</math></i> .....	77
Figura 70. <i>Muestra intermedia, dilución <math>10^4</math></i> .....	77
Figura 71. <i>Muestra final, dilución <math>10^1</math></i> .....	77
Figura 72. <i>Muestra inicial, dilución <math>10^6</math></i> .....	77
Figura 73. <i>Muestra intermedia, dilución <math>10^3</math></i> .....	77
Figura 74. <i>Muestra final, dilución <math>10^2</math></i> .....	77
Figura 75. <i>Muestra inicial, dilución <math>10^8</math></i> .....	78
Figura 76. <i>Muestra intermedia, dilución <math>10^7</math></i> .....	78
Figura 77. <i>Muestra final, dilución <math>10^6</math></i> .....	78
Figura 78. <i>Parámetros de calidad para reúso de aguas residuales tratadas en riego de cultivos no comestibles y áreas verdes</i> .....	79
Figura 79. <i>Comparación global de variables fisicoquímicas y microbiológicas en pruebas con cavitadores hidrodinámicos estático y rotativo</i> .....	80
Figura 80. <i>Tendencia de los Cavitadores</i> .....	84
Figura 81. <i>Resultados prueba T-student</i> .....	85

### Lista de tablas

	<b>Pág.</b>
Tabla 1. Caudales con el número de pasadas .....	28
Tabla 2. pH y Temperatura en el cavitador estático .....	29
Tabla 3. pH y Temperatura en el cavitador rotativo.....	29
Tabla 4. Concentración de sales para la dilución en la prueba 1.....	57
Tabla 5. Concentración de sales para la dilución en la prueba 2.....	58
Tabla 6. Concentración de sales para la dilución en la prueba 3,4,5 .....	58
Tabla 7. Datos del número de pasadas vs pH de las pruebas realizadas en el cavitador hidrodinámico estático .....	58
Tabla 8. Datos del número de pasadas vs temperatura de las pruebas realizadas en el cavitador hidrodinámico estático.....	59
Tabla 9. Valores de turbidez en tres fases del tratamiento con cavitación en el cavitador hidrodinámico estático.....	60
Tabla 10. Valores de la reducción logarítmica vs número de pasadas de las pruebas realizadas en el cavitador estático.....	60
Tabla 11. Datos DBO de las pruebas 3 y 4 realizadas en el cavitador estático.....	60
Tabla 12. Datos del número de pasadas vs pH de las pruebas realizadas en el cavitador hidrodinámico rotativo.....	61
Tabla 13. Datos del número de pasadas vs temperatura de las pruebas realizadas en el cavitador hidrodinámico rotativo .....	62
Tabla 14. Valores de turbidez en tres fases del tratamiento con cavitación en el cavitador hidrodinámico rotativo.....	63
Tabla 15. Valores de la reducción logarítmica vs número de pasadas de las pruebas realizadas en el cavitador rotativo.....	63
Tabla 16. Parámetros fisicoquímicos y sus valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales de aguas residuales no domésticas – ArnD para las actividades industriales, o comerciales o de servicios diferentes con vertimientos puntuales a cuerpos de agua superficiales. ....	64
Tabla 17. Medición del tiempo y cálculo del caudal en el cavitador hidrodinámico estático.....	83
Tabla 18. Medición del tiempo y cálculo del caudal en el cavitador hidrodinámico rotativo .....	83
Tabla 19. Comportamiento del cavitador estático y el cavitador rotativo .....	84

## Tabla de apéndices

	<b>Pág.</b>
Apéndice A: Resultados de pruebas preliminares .....	56
Apéndice B: Preparación y concentración de soluciones salinas utilizadas en las diluciones (Nacl, Cacl, Kh <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> ) .....	57
Apéndice C: Resultados de pruebas experimentales del cavitador hidrodinámico estático.....	58
Apéndice D: Resultados de pruebas experimentales del cavitador hidrodinámico rotativo .....	61
Apéndice E. Parámetros fisicoquímicos para aguas no domésticas .....	64
Apéndice F. Filtrado y preparación del agua a tratar.....	67
Apéndice G. Sales usadas en la dilución .....	68
Apéndice H. Preparación de agua peptonada y Agar .....	69
Apéndice I. Preparación de diluciones e inoculación de muestras.....	70
Apéndice J. Registro de muestras y datos.....	71
Apéndice K. Medición DBO.....	72
Apéndice L. Evidencias fotográficas de las pruebas realizadas en el cavitador hidrodinámico estático....	73
Apéndice M. Evidencias fotográficas de las pruebas realizadas en el cavitador hidrodinámico rotativo. .	76
Apéndice N. Parámetros fisicoquímicos para aguas riego.....	79
Apéndice R. Datos globalizados de las pruebas experimentales con cavitadores hidrodinámicos .....	80
Apéndice S. Preparación de diluciones, medio de cultivo y siembra de las muestras diluidas.....	81
Apéndice T: Resultados del aforo para cada cavitador.....	83

## Resumen

**Título:** Evaluación de la cavitación en el tratamiento de aguas residuales con fines de reúso agroindustrial para AC Ingeniería Virtual.

**Autores:** Jeniffer Katerinne Castro Moreno, Angie Valentina Mesa Ramírez. \*\*

**Palabras clave:** Cavitación hidrodinámica, tratamiento de aguas residuales, reducción microbiológica, reúso agroindustrial, turbidez, demanda bioquímica de oxígeno (DBO), pH, temperatura, cavitador estático, cavitador rotativo.

**Descripción:** La empresa AC Ingeniería Virtual, ubicada en Bucaramanga, Santander, se dedica al desarrollo e implementación de tecnologías avanzadas, tales como la simulación computacional, la visión y la inteligencia artificial, orientadas a la mejora de procesos industriales. Con el objetivo de optimizar los sistemas de tratamiento de aguas residuales, diseñó y construyó un reactor avanzado de cavitación hidrodinámica rotacional como una solución innovadora, superando las limitaciones de los métodos convencionales de tratamiento terciario o avanzado, al no requerir productos químicos adicionales. Además, la empresa cuenta con un cavitador hidrodinámico estático, lo que permite realizar comparaciones entre ambas configuraciones para evaluar su eficiencia y aplicabilidad en distintos sectores industriales.

La presente investigación evaluó la viabilidad técnica de la cavitación hidrodinámica (HC), en configuraciones estática y rotativa, la metodología incluyó una revisión bibliográfica de la tecnología ARCHR, se evaluaron parámetros fisicoquímicos como el pH, la temperatura, turbidez y el análisis microbiológico. Para ello se realizaron pruebas cada una con su respectivo duplicado, teniendo como variable controlada el tiempo de exposición. Además, se realizó una comparación entre los dos cavitadores para observar cuál fue el comportamiento de cada uno en la reducción microbiana del agua residual de la industria panificadora.

Se observó una mejora en el desempeño del cavitador estático, el cual mostró una mayor eficiencia en la remoción de turbidez, aunque con menor efectividad microbiológica (R LOG máxima de 4.07). En contraste, el cavitador rotativo presentó una capacidad desinfectante superior (R LOG de hasta 4.79), pero con menor eficiencia en la reducción de turbidez. Estos resultados sugieren que la cavitación rotativa es más eficaz para la desinfección microbiológica, mientras que la cavitación estática favorece la estabilización de sólidos en suspensión. En conjunto, ambos sistemas muestran un alto potencial para su aplicación en esquemas de reúso de aguas residuales no potables, como el riego agrícola, siempre que se incorporen controles complementarios, como el ajuste del pH, para asegurar el cumplimiento de la normativa vigente.

\*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:** Evaluation of cavitation in wastewater treatment for agroindustrial reuse for AC Virtual Engineering.

**Authors:** Jeniffer Katerinne Castro Moreno, Angie Valentina Mesa Ramirez. \*\*

**Keywords:** Hydrodynamic cavitation, wastewater treatment, microbiological reduction, agro-industrial reuse, turbidity, biochemical oxygen demand (BOD), pH, temperature, static cavitator, rotary cavitator

**Description:** AC Ingeniería Virtual, located in Bucaramanga, Santander, is dedicated to the development and implementation of advanced technologies, such as computational simulation, vision, and artificial intelligence, aimed at improving industrial processes. With the aim of optimizing wastewater treatment systems, it designed and built an advanced rotational hydrodynamic cavitation reactor as an innovative solution, overcoming the limitations of conventional tertiary or advanced treatment methods by not requiring additional chemicals. In addition, the company has a static hydrodynamic cavitator, which allows comparisons between both configurations to evaluate their efficiency and applicability in different industrial sectors.

This research evaluated the technical feasibility of hydrodynamic cavitation (HC) in static and rotating configurations. The methodology included a literature review of ARCHR technology, and physicochemical parameters such as pH, temperature, turbidity, and microbiological analysis were evaluated. To this end, tests were carried out, each with its respective duplicate, with exposure time as the controlled variable. In addition, a comparison was made between the two cavitators to observe the behavior of each in the microbial reduction of wastewater from the baking industry.

An improvement in the performance of the static cavitator was observed, which showed greater efficiency in turbidity removal, although with lower microbiological effectiveness (maximum R LOG of 4.07). In contrast, the rotary cavitator had superior disinfecting capacity (R LOG of up to 4.79), but with lower efficiency in turbidity reduction. These results suggest that rotary cavitation is more effective for microbiological disinfection, while static cavitation favors the stabilization of suspended solids. Together, both systems show high potential for application in non-potable wastewater reuse schemes, such as agricultural irrigation, provided that complementary controls, such as pH adjustment, are incorporated to ensure compliance with current regulations.

\*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.

## Introducción

AC Ingeniería Virtual, fundada en 2012, es una empresa especializada en ingeniería computacional orientada al desarrollo de soluciones innovadoras bajo los principios de la Industria 4.0. Su enfoque integra modelamiento, simulación y virtualización de procesos industriales, utilizando tecnologías avanzadas como simulación numérica, prototipo, automatización e inteligencia artificial, facilitando la transferencia de conocimiento desde la investigación hacia el entorno productivo. (ACIV, s. f.)

En Colombia, la industria panificadora genera aguas residuales con alta carga orgánica, grasas, harinas y residuos de limpieza que, sin tratamiento, representan un riesgo ambiental. Dado que el sector agrícola consume alrededor del 70% del agua a nivel mundial y enfrenta escasez, el reúso de aguas residuales industriales es una alternativa sostenible, aunque los métodos tradicionales no eliminan totalmente los microcontaminantes (Food and Agriculture Organization of the United Nations [FAO], 2022).

La cavitación hidrodinámica es una tecnología emergente que genera condiciones físicas extremas, favoreciendo la desinfección y la degradación de compuestos orgánicos en aguas residuales. Su eficacia varía según el tipo de efluente y las condiciones operativas. En este estudio se evaluó el desempeño de dos cavitadores hidrodinámicos, uno estático y otro rotativo, en el tratamiento de aguas residuales de la industria panificadora, con el fin de reducir su carga orgánica y microbiológica. La investigación busca responder: ¿Qué efecto tiene el tipo de cavitador (estático y rotativo) en la eficiencia del tratamiento de aguas residuales de la industria panificadora para su reúso agrícola?

## 1. Objetivos

### 1.1 Objetivo general

Evaluar la cavitación en el tratamiento terciario de aguas residuales provenientes de la industria panificadora con fines de reúso Agroindustrial.

### 1.2 Objetivos específicos

- Realizar una revisión bibliográfica sobre la tecnología ARCHR (Advanced Reactive Cavitation Hydrodynamic Reactor), enfocada en los principios de funcionamiento y en las aplicaciones en el tratamiento de aguas residuales provenientes de la industria panificadora.
- Evaluar la influencia de las variables operativas (número de pasadas, temperatura, presión, caudal, pH) del cavitador hidrodinámico estático y el cavitador hidrodinámico rotativo en el tratamiento terciario de las aguas residuales generadas por la industria panificadora.
- Comparar el proceso de cavitación hidrodinámico estático y el proceso de cavitación hidrodinámico rotativo mediante la evaluación de la eficiencia en la reducción microbiana del agua residual de la industria panificadora.

## **2 Marco teórico**

### **2.1 Aguas residuales industriales y su reúso**

Las aguas residuales industriales presentan gran variabilidad en caudal y composición, según el tipo de industria, materias primas y procesos. Suelen contener contaminantes complejos como metales pesados, hidrocarburos y compuestos recalcitrantes, que pueden inhibir los tratamientos biológicos convencionales. En particular, la industria panificadora genera aguas con alta carga orgánica y química debido a restos de harinas, grasas, aceites, masa y productos de limpieza, lo que eleva la DQO, DBO y altera el pH (ALMAWATECH, s.f.).

Es fundamental una caracterización precisa de estos efluentes, considerando parámetros fisicoquímicos (DBO, DQO, pH, sólidos, grasas), microbiológicos y tóxicos, para definir estrategias de tratamiento y disposición final. Un manejo adecuado protege los cuerpos receptores y asegura el cumplimiento normativo (Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, s.f.).

En este contexto, el reúso del agua tratada surge como una estrategia sostenible. Según su calidad, puede destinarse a fines urbanos, agrícolas, industriales o incluso potables (rwl Water, 2015). En el ámbito agroindustrial, el reúso es especialmente relevante, ya que permite reducir el consumo hídrico. No obstante, los requisitos del tratamiento varían según el destino del cultivo: los de consumo humano exigen mayor calidad que los industriales como el algodón o la palma (Vera et al., 2016).

### **2.2 Caracterización de aguas residuales industriales**

La caracterización de las aguas residuales es esencial para comprender su composición y definir los tratamientos más adecuados. Esta evaluación incluye parámetros físicos, químicos y

sensoriales que inciden directamente en la eficiencia de los procesos de depuración. Entre ellos, el olor asociado a gases como el sulfuro de hidrógeno permite detectar actividad biológica inicial, mientras que la temperatura, generalmente elevada por la acción microbiana, influye en la solubilidad del oxígeno y en la dinámica del ecosistema acuático. Por su parte, la densidad varía según la concentración de sustancias presentes, afectando la sedimentación y el comportamiento hidráulico del agua residual.

Asimismo, la turbiedad indica la presencia de partículas suspendidas que interfieren en procesos como la desinfección y la filtración. El contenido de sólidos, tanto disueltos como suspendidos, constituye un parámetro clave en la evaluación de la carga contaminante y en el cumplimiento normativo. Finalmente, el pH regula la acidez o alcalinidad del agua, condicionando la solubilidad de compuestos y la actividad de los microorganismos. En conjunto, estos parámetros permiten establecer un perfil integral del agua residual, facilitando su tratamiento y su posible reúso de forma segura y eficiente.

### **2.3 Tecnologías de Tratamiento para el Reúso Agrícola**

Las tecnologías para el tratamiento de aguas residuales deben eliminar contaminantes físicos, químicos y biológicos. En áreas tropicales y subtropicales, la OMS/OPS/CEPIS sugieren las lagunas de estabilización por su bajo costo y fácil operación.

Estudios recientes han explorado alternativas más eficaces como la combinación de coagulación-floculación, filtración y ozonización, que ha demostrado eficiencias superiores al 90% en la eliminación de contaminantes fisicoquímicos y más del 99.999% en la remoción microbiológica. Estas tecnologías emergen como opciones viables para cumplir con estándares

internacionales, aunque su implementación requiere mayores inversiones y capacidad técnica. (Álvarez & Domínguez, 2015).

#### **2.4 Dimensiones de la Calidad del Agua para Reúso**

El reúso de aguas residuales en actividades productivas exige cumplir estándares que garanticen la calidad sanitaria, agronómica y ambiental. La calidad sanitaria prioriza la eliminación de patógenos, evaluada mediante indicadores como coliformes fecales y huevos de helmintos. La calidad agronómica considera nutrientes beneficiosos (como nitrógeno, fósforo y potasio) y limita sustancias tóxicas como metales pesados, boro o sales. La calidad ambiental controla sólidos, materia orgánica y nutrientes para prevenir efectos como la eutrofización o el deterioro de cuerpos de agua (Álvarez & Domínguez, 2015).

#### **2.5 Caracterización y Tratamiento de Aguas**

Los tratamientos de aguas residuales se dividen en métodos físicos, químicos y biológicos, aplicados en etapas preliminar, primaria, secundaria y terciaria (Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, s.f.). Su selección depende de la composición del agua, los contaminantes presentes, la eficiencia requerida y los recursos disponibles.

En la industria panificadora, las aguas residuales presentan una carga contaminante característica compuesta por materia orgánica proveniente de harinas y masas, que elevan la DBO debido a su alto contenido de carbohidratos; grasas y aceites, que pueden obstruir las tuberías y disminuir la eficiencia del tratamiento si no se separan previamente; agentes de limpieza que alteran el pH y la composición química del agua, requiriendo pretratamiento; y una alta variabilidad en el caudal generada por los picos de producción y procesos de limpieza, lo cual debe ser considerado en el diseño del sistema de tratamiento.

## 2.6 Normativa

A través de la Resolución 1256 de 2021, el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible reglamentó el reúso y la recirculación de aguas. Esta medida impulsa una gestión hídrica más sostenible frente a desafíos como la escasez y el cambio climático, destacando el reúso y la recirculación como estrategias clave para optimizar el uso del agua y reducir impactos ambientales. (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2021)

Por otro lado, la Resolución 631 de 2015 del Ministerio de Ambiente establece los límites máximos permitidos para los vertimientos de aguas residuales a cuerpos de agua y al alcantarillado. Aplica a actividades domésticas, industriales y de servicios, clasificando los sectores según sus vertimientos. También define los parámetros físicos, químicos y microbiológicos para proteger los recursos hídricos y asegurar un manejo adecuado de los efluentes. En la Tabla 16 (Ver Apéndice E)

## 2.7 Cavitación Hidrodinámica

La cavitación es un fenómeno físico que consiste en la formación, expansión y colapso repentino de microburbujas de vapor en un fluido, provocado por una disminución local de presión por debajo de la presión de vapor del líquido. Durante su implosión, que ocurre en microsegundos, se liberan elevadas cantidades de energía, generando condiciones extremas de temperatura y presión en zonas muy localizadas, conocidas como “puntos calientes”. Estos eventos generan radicales libres, microchorros y turbulencia mediante una caída súbita de presión, provocando efectos térmicos, mecánicos y químicos que permiten modificar diferentes matrices, destacándose en el tratamiento de aguas residuales. (Panchal et. al., 2018)

### 3 Estado del arte

El tratamiento de aguas residuales ha surgido como una necesidad creciente y representa un desafío para la tecnología moderna, que busca combinar alta eficiencia en la eliminación de contaminantes con bajos costos operativos. En este contexto, la cavitación hidrodinámica se ha consolidado en los últimos años como una técnica prometedora, mostrando un aumento notable en la oxidación y degradación de contaminantes, como evidencian diversos estudios especializados (Gagol, Przyjazny & Boczkaj, 2018).

Por ejemplo, Dhanke y Wagh demostraron que la cavitación hidrodinámica es una alternativa innovadora para el tratamiento de aguas residuales provenientes de refinerías de aceite vegetal, mejorando la biodegradabilidad del efluente al incrementar la relación entre la demanda bioquímica y química de oxígeno (DBO/DQO). Asimismo, Lafuente y López (2023) aplicaron cavitación generada en un tubo Venturi para desinfectar aguas del río Santa Clara en Ecuador, alcanzando eficiencias superiores al 99% de eliminación bacteriana bajo condiciones controladas de presión.

De manera complementaria, Lebiocka (2020) evaluó el uso de la cavitación hidrodinámica para mejorar la biodegradabilidad de aguas residuales municipales, encontrando una degradación eficiente de materia orgánica difícil de tratar y un aumento significativo en los índices de biodegradabilidad, lo que favorece el tratamiento biológico posterior.

En términos generales, la cavitación hidrodinámica se basa en la formación y colapso violento de burbujas de vapor generadas por variaciones de presión en el fluido. Este fenómeno libera energía física y química capaz de degradar colorantes, compuestos orgánicos recalcitrantes y patógenos, como lo detalla Jin et al. (2022), consolidando esta tecnología como una alternativa

eficiente y sostenible para el tratamiento de aguas residuales industriales sin necesidad de agentes químicos.

En este contexto, la tecnología ARCHR (Advanced Reactive Cavitation Hydrodynamic Reactor) utiliza el principio de la cavitación hidrodinámica para generar microburbujas que, al colapsar, liberan energía mecánica, térmica y radicales  $\cdot\text{OH}$  con un alto poder oxidante. Esta acción permite degradar compuestos orgánicos y desinfectar sin químicos adicionales. Aplicada a efluentes de la industria panificadora, caracterizados por su alta carga de materia orgánica, grasas y carbohidratos, ARCHR facilita la oxidación avanzada de contaminantes, reduce la carga microbiana y mejora la biodegradabilidad del agua residual. Además, ofrece alta eficiencia energética y un claro potencial de escalado, posicionándose como una alternativa más sostenible y eficaz frente a las tecnologías convencionales (Gutiérrez Mosquera, Arias Giraldo & Cardona Naranjo, 2019).

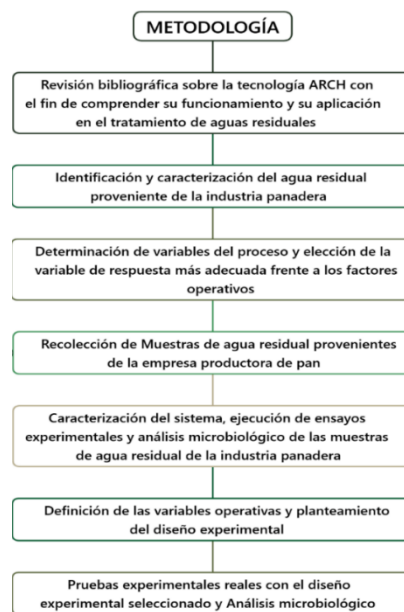
Finalmente, esta propuesta cobra especial relevancia en el contexto normativo colombiano, donde la Resolución 1256 de 2021 establece criterios técnicos y sanitarios para el reúso seguro y sostenible de aguas residuales, respaldando tecnologías emergentes como la cavitación hidrodinámica. Este marco regulatorio, complementado por el Decreto 1076 de 2015 y la Ley 373 de 1997, promueve la implementación de soluciones innovadoras para el tratamiento avanzado y sostenible de aguas residuales, potenciando el impacto ambiental positivo de la tecnología ARCHR y la cavitación hidrodinámica en general.

## 4 Metodología

La ejecución de la práctica se realizó conforme a los objetivos previamente definidos, permitiendo un desarrollo estructurado y coherente de las etapas del estudio. La figura a continuación ilustra de manera esquemática la metodología general adoptada.

**Figura 1:**

*Esquema metodológico*



**Fuente:** *Autores*

### 4.1 Revisión bibliográfica sobre la tecnología ARCHR (Advanced Rotational Cavitation Hydrodynamic Reactor), orientada a comprender sus principios de funcionamiento y sus aplicaciones en el tratamiento de aguas residuales

Para cumplir con el primer objetivo específico, se llevó a cabo una revisión bibliográfica utilizando palabras clave como cavitación hidrodinámica, ARCHR, tratamiento de aguas residuales, reúso agroindustrial, DBO y eficiencia microbiológica. Las búsquedas se realizaron en Google Académico y en la Biblioteca Virtual de la UIS, consultando bases como ScienceDirect,

SciELO, Dialnet y Academia.edu. Se seleccionaron artículos científicos y técnicos publicados entre 2015 y 2024, priorizando los que presentaban rigurosidad metodológica, acceso completo y pertinencia temática.

#### **4.2 Recolección de muestras de agua residual provenientes de la empresa productora de pan**

En esta fase se realizó la recolección de muestras de agua residual generada en distintas etapas del proceso de producción de la empresa panificadora, principalmente asociadas a actividades de limpieza de equipos, utensilios y superficies. La toma de muestras se efectuó directamente en la empresa, siguiendo los lineamientos establecidos en la norma NTC-ISO 5667-3, que regula los procedimientos para el muestreo de aguas residuales. (Avance Jurídico Casa Editorial Ltda., s. f.)

Para ello, se utilizaron recipientes previamente esterilizados, asegurando condiciones adecuadas de preservación, transporte y almacenamiento, con el fin de evitar alteraciones fisicoquímicas o microbiológicas. Estas muestras fueron destinadas a la fase experimental, permitiendo evaluar la eficiencia del tratamiento por cavitación en condiciones reales de operación.

#### **4.3 Identificación y caracterización del agua residual industrial proveniente de la industria panificadora**

Durante esta fase se identificó el origen del agua residual generada en las distintas etapas del proceso productivo de la industria panificadora, tales como el lavado de utensilios, equipos y superficies. Se realizó una descripción preliminar del tipo de efluente, considerando su aspecto visual, color, presencia de materia orgánica visible y generación por tipo de actividad. Esta información permitió establecer una base contextual para etapas posteriores del estudio, orientadas

al tratamiento y evaluación de su comportamiento frente a tecnologías avanzadas como la cavitación.

Se caracterizó el agua residual mediante parámetros fisicoquímicos y microbiológicos (pH, temperatura, turbidez, DBOs, coliformes totales y *Escherichia coli*) para establecer la calidad del efluente previo al tratamiento y evaluar la eficiencia de la cavitación hidrodinámica. El análisis se realizó en el laboratorio del SENA Tecnoparque Nodo Bucaramanga, siguiendo la norma ISO 5667-3:2024 para manejo, preservación y transporte de muestras (International Organization for Standardization, 2024).

#### 4.4 Pruebas exploratorias

Para realizar estas pruebas exploratorias se establecieron parámetros fijos de presión, caudal y tiempo. Para ello, se propuso una duración de 4 horas y 2 horas y 15 minutos, un volumen de 24 L, y una presión constante de 31 psi. con el fin de observar las condiciones de operación más adecuadas. Se tomaron tres muestras (inicial, media y final). Adicionalmente, para cada muestra se realizó la medición de temperatura y pH, para proceder a realizar el análisis microbiológico.

Durante la segunda prueba, se detectó una carga microbiológica excesivamente alta en el agua residual, con una concentración inicial superior a  $10^{11}$ , lo que dificultó el análisis cuantitativo y limitó la evaluación precisa de la eficiencia del tratamiento. Para superar esta limitación, se implementó un proceso de dilución utilizando una solución compuesta por NaCl, CaCl y  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  (ver Apéndice B), con el fin de ajustar la concentración microbiana a rangos medibles.

En las pruebas experimentales reales, para la prueba 1 se empleó una dilución de 14 litros de agua con sales por 10 litros de agua residual. Sin embargo, los resultados mostraron que la carga

microbiana seguía siendo elevada, por lo que fue necesario reducir aún más la concentración inicial. En la prueba 2, se utilizó una dilución de 17 litros de agua con sales por 7 litros de agua residual, lo que permitió obtener mejores resultados. Finalmente, con el objetivo de observar con mayor claridad el comportamiento del proceso de desinfección en ambos cavitadores, se optó por una dilución más alta en las pruebas 3, 4 y 5, empleando 22 litros de agua diluida con sales por 2 litros de agua residual.

#### **4.5 Caracterización del sistema, ejecución de ensayos experimentales y análisis microbiológico de las muestras de agua residual**

En esta fase se realizó la caracterización de los sistemas de cavitación utilizados para el tratamiento del agua residual industrial provenientes de la industria panificadora, detallando sus componentes, tipo de reactor y condiciones operativas seleccionadas. Para posteriormente, llevar a cabo ensayos experimentales en los que las muestras recolectadas eran sometidas a diferentes números de pasadas a través del reactor, con el objetivo de evaluar el efecto del tratamiento sobre la carga microbiana presente en el efluente.

##### ***4.5.1 Montaje de los sistemas de cavitación hidrodinámica rotativa y cavitación hidrodinámica estática***

El proceso de instalación del sistema se inició con la obtención de los materiales, siguiendo las especificaciones del plano técnico proporcionado por la empresa. Además, previo a la operación, se realizaron pruebas de circulación con agua para descartar posibles fugas, validando así su correcto funcionamiento para la puesta en marcha de cada equipo.

**Figura 2.**

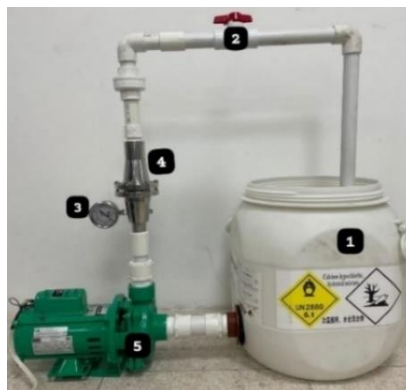
*Esquema del sistema de cavitación hidrodinámica rotativa*



Nota: El sistema está conformado por: (1) Recipiente de almacenamiento, (2) válvulas de paso tipo bola, (3) Manómetro tipo Bourdon (rango de 0 a 100 psi), (4) Cavitador Rotativo tipo rotor – estator de acero inoxidable, (5) Motores eléctricos de 1 y 0,5 Hp de marca WEG.

**Figura 3.**

*Esquema del sistema de cavitación hidrodinámica estática*



Nota: El sistema está conformado por: (1) Recipiente de almacenamiento, (2) válvulas de paso tipo bola, (3) Manómetro tipo Bourdon (rango de 0 a 100 psi), (4) Cavitador Estático tipo venturi de acero inoxidable, (5) Motor eléctrico de 1,3 Hp de marca WEG.

#### **4.6 Planteamiento del diseño experimental**

Con el fin de evaluar de manera estructurada el efecto del tratamiento por cavitación en el agua residual, se implementó un diseño factorial completamente aleatorizado con medidas repetidas en el tiempo. (Montgomery, 2020)

Se consideraron dos factores: el tipo de cavitador (rotativo y estático) como factor entre tratamientos, y el tiempo de muestreo (inicial, media y final) como factor dentro de tratamientos. Ambos cavitadores operaban de manera simultánea durante cada una de las cinco pruebas experimentales independientes. Las muestras se recolectaron en tres momentos definidos del proceso, y para cada muestra se realizaron duplicados en la etapa de siembra microbiológica. Este diseño permitió evaluar tanto el efecto individual de cada cavitador y del tiempo, como su posible interacción, sobre la variable de respuesta: la reducción microbiana (UFC/mL).

Adicionalmente se realizó una prueba de T-student para dos muestras independientes de las dos reducciones logarítmicas tanto del cavitador hidrodinámico estático y rotativo, con el fin de comparar cuál de los dos es el más eficiente.

#### **4.7 Pruebas experimentales reales con el diseño experimental seleccionado y análisis microbiológico**

Durante el desarrollo de cada prueba experimental, se realizó un monitoreo detallado de las variables operativas más relevantes que afectan el desempeño del proceso de cavitación, parámetros que fueron seleccionados por su influencia directa en la eficiencia del tratamiento y en la viabilidad microbiológica de las muestras. La medición sistemática de estas variables permitió

evaluar las condiciones del proceso y su impacto en la calidad del agua tratada, además de facilitar un análisis estadístico robusto para la comparación entre ambos sistemas.

**Temperatura:** La temperatura del agua se midió mediante un equipo de sobremesa HANNA INSTRUMENTS HI 2550, considerando que la cavitación puede provocar aumentos térmicos que inciden en la eficiencia del proceso y en la viabilidad bacteriana.

**pH:** Las mediciones de pH se realizaron con un MEDIDOR DE SOBREMESA PH, ORP, °C, EC, TDS Y NACL HI 2550, HANNA®. Las variaciones observadas sirven como indicativo de posibles transformaciones químicas generadas por la cavitación, lo que podría afectar la viabilidad bacteriana.

**Turbidez:** La turbidez del agua fue medida con un turbidímetro portátil calibrado marca HACH 2100Q, el cual proporciona lecturas rápidas y confiables en unidades NTU, conforme a los estándares EPA y métodos estándar para el análisis de agua. Los cambios en los valores de turbidez reflejan la alteración en la concentración de sólidos suspendidos, lo cual permite estimar la eficacia del tratamiento en la remoción de contaminantes presentes en el agua residual.

**DBO:** La Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) se utilizó para evaluar la cantidad de materia orgánica biodegradable en el agua residual antes y después del tratamiento de cavitación. A cada muestra se le agregaron nutrientes como fosfato, cloruro de magnesio, cloruro de calcio y cloruro de hierro (ver Apéndice M). Posteriormente, se midió el oxígeno disuelto inicial ( $OD_0$ ). Las muestras fueron inoculadas a temperatura y presión ambiente y se mantuvieron en incubación durante cinco días en condiciones de oscuridad; luego, se midió el oxígeno final ( $OD_5$ ). Para la medición del oxígeno disuelto y cálculo de la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO), se utilizó

un medidor portátil HANNA Instruments HI98193, el cual permite realizar lecturas precisas de OD en mg/L, adecuadas para ensayos ambientales y análisis de aguas residuales.

#### 4.8 Determinación de variables del proceso y elección de la variable de respuesta más adecuada frente a los valores operativos

Se establecieron las variables relevantes del proceso de tratamiento mediante cavitación, considerando como parámetros operativos constantes el caudal y la presión. El tiempo de tratamiento fue la única variable controlada del proceso; por lo tanto, se definieron cinco pruebas con un tiempo de duración para cada una, las cuáles se presentan en la Tabla 1. La presión fue constante en todo el proceso, para el cavitador estático fue de 31 psi y para el cavitador rotativo fue de 14,1 psi. El caudal de cada cavitador fue determinado mediante un aforo realizado para un volumen de 9 litros. Los resultados del aforo se encuentran en la Tabla 17 y 18 (Ver Apéndice T). Una vez conocido el caudal, fue posible calcular el número de pasadas utilizando la siguiente fórmula:

$$Np = \frac{Q * t}{v} \quad \text{Ec. 1}$$

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

**Tabla 1.**

*Caudales con el número de pasadas*

Prueba	Tiempo de Duración (min)	Caudal Cavitador Estático	Número de Pasadas	Caudal Cavitador Rotativo	Número de Pasadas
1	180	0.76	342	2.2	990
2	240	0.76	456	2.2	1320
3	270	0.76	513	2.2	1485

4	210	0.76	399	2.2	1155
5	240	0.76	456	2.2	1320

Por otro lado, el pH y la temperatura dependían directamente del proceso de cavitación, ya que tendían a aumentar con el tiempo. Por esta razón, se realizaron mediciones al inicio, a la mitad y al final de cada prueba, con el fin de observar cómo variaban estos parámetros a lo largo del tratamiento. Observar la Tabla 2 y 3

**Tabla 2.**

*pH y Temperatura en el cavitador estático*

<i>Prueba</i>	<i>pH</i>			<i>Temperatura</i>		
	<b>Inicial</b>	<b>Media</b>	<b>Final</b>	<b>Inicial</b>	<b>Media</b>	<b>Final</b>
1	6	6	6.2	25.2	26.1	51.1
2	5.4	5.4	5.5	24.1	45.5	55.5
3	6	5.9	5.9	25.6	49.4	55.3
4	6	5.5	5.5	25.7	48.8	57.1
5	6	5.7	5.6	24.4	44	46.7

**Tabla 3.**

*pH y Temperatura en el cavitador rotativo*

<i>Prueba</i>	<i>pH</i>			<i>Temperatura</i>		
	<b>Inicial</b>	<b>Media</b>	<b>Final</b>	<b>Inicial</b>	<b>Media</b>	<b>Final</b>
1	6	6.1	6.2	25.65	53.6	61.2
2	5.4	5.6	5.6	24.1	54.1	45.5
3	6	5.9	5.9	25.6	54.1	54.1
4	6	5.6	5.5	25.7	56.4	61.4
5	6	5.6	5.6	24.4	59.2	64.4

A partir de esta evaluación, se definieron como variables de respuesta la reducción de la carga microbiana medida en unidades formadoras de colonia por mililitro (UFC/mL), el pH, y la temperatura. Teniendo en cuenta que el objetivo principal es la reducción microbiana del agua residual tratada.

#### ***4.8.1 Análisis microbiológico de las pruebas experimentales reales***

El objetivo fue observar la evolución de parámetros como pH, temperatura y turbidez, así como comparar las concentraciones microbianas antes y después del tratamiento. Esta comparación permitió evaluar el efecto del número de pasadas como variable operativa sobre la eficiencia del sistema. Finalmente, se aplicó el mismo procedimiento en cada uno de los ensayos experimentales realizados. El proceso para la preparación de diluciones, preparación del medio de cultivo y siembra de las muestras diluidas. (Ver Apéndice S)

Para evaluar la efectividad del tratamiento aplicado mediante cavitación, se realizaron análisis microbiológicos a cada una de las muestras recolectadas durante las pruebas experimentales. El procedimiento consistió en aplicar diluciones seriadas y sembrar en placas con Agar chromocult como medio de cultivo, con el fin de cuantificar las unidades formadoras de colonias (UFC) de coliformes y *E. coli*. Esta metodología permitió estimar la concentración bacteriana presente en las muestras inicial, intermedia y final, y así determinar el grado de reducción microbiana generado por cada sistema de cavitación. El conteo de colonias se realizó después de la incubación, considerando el factor de dilución para calcular la concentración de UFC/mL mediante la fórmula correspondiente.

$$\frac{UFC}{ml} = \frac{\text{Número de colonias contadas} * \text{Factor de dilución}}{\text{Volumen sembrado (ml)}} \quad \text{Ec.2}$$

## **5 Resultados y análisis**

A continuación, se presentan los resultados y el análisis obtenidos, en concordancia con los objetivos establecidos para esta investigación. Las pruebas experimentales se ejecutaron conforme al protocolo definido, empleando de manera simultánea dos cavitadores hidrodinámicos: uno de tipo rotativo y otro estático. El diseño experimental permitió determinar la eficiencia del sistema en la mejora de la calidad del agua residual, con especial énfasis en la reducción de la carga orgánica. Adicionalmente, se registraron parámetros como pH y temperatura con el fin de evaluar el comportamiento del sistema bajo condiciones operativas controladas.

### **5.1 Revisión bibliográfica sobre la tecnología ARCHR (Advanced Rotational Cavitation Hydrodynamic Reactor)**

Como el primer objetivo contemplaba una revisión bibliográfica de la tecnología ARCHR (Advanced Rotational Cavitation Hydrodynamic Reactor), a continuación, se muestran los resultados de dicha revisión.

#### ***5.1.1 Cavitación Hidrodinámica***

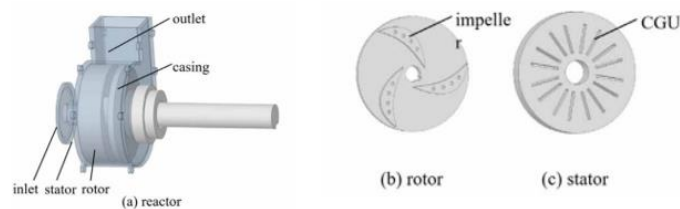
La cavitación es un proceso físico en el que se forman y colapsan rápidamente microburbujas de vapor dentro de un fluido debido a una caída local de presión. Este colapso libera energía en forma de altas temperaturas, presiones y radicales libres, generando efectos térmicos, mecánicos y químicos que la hacen útil en aplicaciones como el tratamiento de aguas residuales.

En comparación con los otros dos modos de cavitación, la cavitación hidrodinámica ofrece mayor eficiencia y menor consumo energético. Además, es más fácil de implementar en la práctica y ofrece ventajas económicas considerables. Por lo tanto, la cavitación hidrodinámica es más

adecuada para la industria del tratamiento de agua y ha sido ampliamente estudiada a nivel mundial. (Song *et al.*, 2022)

#### Figura 4.

*Cavitador hidrodinámico.*



**Fuente:** Imagen tomada de Song *et al.* (2022)

La imagen muestra un reactor de cavitación hidrodinámica rotativo conformado por una carcasa, una entrada, una salida, un rotor y un estator. El fluido ingresa por la entrada y es acelerado por el rotor, cuyas paletas generan zonas de baja presión. Luego, el flujo es dirigido al estator, que contiene una unidad generadora de cavitación (CGU) con orificios o ranuras radiales. Al pasar por estas, se producen caídas abruptas de presión que inducen la formación y colapso de burbujas de vapor. Este fenómeno genera condiciones extremas de presión y temperatura, aprovechadas para desinfección, oxidación o degradación de contaminantes, como en el tratamiento de aguas residuales.

#### 5.1.2 Tecnología ARCHR (*Advanced Rotational Cavitation Hydrodynamic Reactor*)

Esta tecnología trata de un reactor avanzado de cavitación hidrodinámica rotacional, diseñado y construido por la empresa AC Ingeniería Virtual, representando un aporte relevante en el desarrollo de tecnologías para el tratamiento de aguas residuales. De igual manera, la empresa proporcionó un cavitador hidrodinámico estático con el objetivo de comparar ambas tecnologías y determinar cuál era la mejor opción. El presente trabajo de grado tiene como objetivo evaluar la

eficiencia técnica de ambos equipos para procesos de desinfección, enfocándose en su capacidad para reducir contaminantes microbiológicos. A través de este estudio se pretende generar información rigurosa que respalde el potencial de aplicación de esta tecnología en entornos industriales, promoviendo su implementación como alternativa eficiente en la gestión de aguas residuales provenientes de la industria panificadora.

La tecnología ARHCR, o reactor avanzado de cavitación hidrodinámica rotacional, se destaca como una solución innovadora para la intensificación de procesos industriales, permitiendo un funcionamiento continuo y eficiente en el tratamiento de aguas residuales. Su diseño rotor-estator genera cavitación mediante la formación de vórtices y separaciones de flujo, donde aspectos geométricos y la velocidad de rotación resultan fundamentales para su desempeño (Li, Zhang, & Chen, 2021a).

En términos prácticos, el ARHCR ha demostrado una alta efectividad en la desinfección de aguas residuales, alcanzando una eliminación del 100% de *E. coli* en tiempos reducidos y con una eficiencia energética favorable. Estos resultados se atribuyen a la combinación de efectos hidrodinámicos y sonoquímicos que causan daños celulares profundos, superando las capacidades del cavitador hidrodinámico estático tradicional (Li, Zhang, & Chen, 2021b).

Adicionalmente, la optimización de la unidad generadora de cavitación mediante modelado computacional ha permitido mejorar el rendimiento del reactor, aumentando el volumen de vapor generado y disminuyendo el esfuerzo mecánico, lo cual se traduce en una mayor eficiencia energética y operacional (Wang, Zhao, & Liu, 2021).

Por último, la correcta disposición espacial de las unidades de generación de cavitación influye directamente en la intensidad y frecuencia de la cavitación, aspectos que se deben ajustar para

maximizar la efectividad del proceso, aunque es necesario complementar con validaciones experimentales para perfeccionar el diseño (Zhao, Wang, & Liu, 2021).

**Figura 5.**

*Reactor de cavitación hidrodinámica  
estática*



**Figura 6.**

*Reactor de cavitación hidrodinámica  
rotacional avanzado*



La revisión bibliográfica permitió comprender los fundamentos de la cavitación hidrodinámica, las condiciones óptimas para su generación y su eficacia en la degradación de contaminantes. Se analizó la tecnología ARHCR, resaltando su diseño innovador, operación continua y ventajas frente a cavitadores convencionales. La evidencia revisada muestra su alta eficiencia en reducción microbiológica, remoción de turbidez y estabilidad de parámetros fisicoquímicos, posicionándola como una alternativa avanzada para el tratamiento de aguas residuales industriales, incluidas las de la industria panificadora, con potencial de reúso en el sector agroindustrial.

## **5.2 Análisis por parámetro para cada cavitador**

Las pruebas experimentales se realizaron basadas en los resultados obtenidos en los ensayos previos, con el propósito de estabilizar los parámetros fisicoquímicos y reducir la carga microbiológica a niveles medibles. La evidencia fotográfica de estas pruebas se presenta en las

Figuras 17 a la 19 del Apéndice A, mientras que los detalles sobre la preparación y concentración de las soluciones salinas utilizadas se encuentran en las Tablas 4 a 6 del Apéndice B.

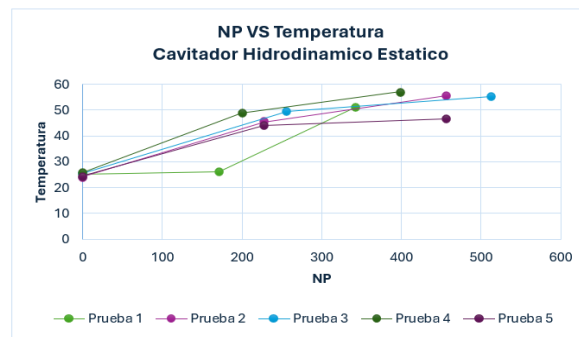
### 5.2.1 Temperatura

#### 5.2.1.1 Cavitador Hidrodinámico Estático

Durante las cinco pruebas realizadas con el cavitador estático, se observó un incremento notable en la temperatura del agua, que pasó de rangos iniciales entre 24,1 °C y 25,7 °C a valores finales entre 46,7 °C y 57,1 °C. Este aumento se debe a la energía liberada durante el colapso de las burbujas de cavitación, lo que genera una transferencia de calor al líquido. Aunque el efecto térmico fue menos intenso que en sistemas rotativos, la cavitación estática demostró ser capaz de elevar significativamente la temperatura, especialmente al incrementarse el número de pasadas (NP) y, por tanto, el tiempo de exposición. Por ejemplo, en la prueba 4 la temperatura alcanzó los 57,1 °C tras 399,8 pasadas, y en la prueba 2 se llegó a 55,5 °C con 456,9 pasadas, lo que intensifica el calentamiento del sistema. Los datos correspondientes a estas pruebas se presentan en la Tabla 8 del Apéndice C y en la Figura 7, que se muestra a continuación.

#### Figura 7.

##### *NP VS Temperatura Cavitador Hidrodinámico Estático*

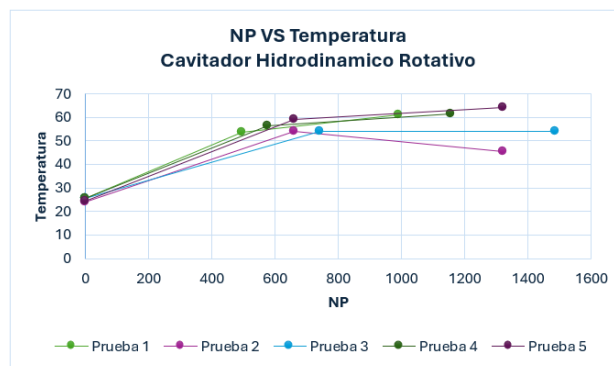


### 5.2.1.2 Cavitador Hidrodinámico Rotativo

En el cavitador rotativo, las temperaturas finales variaron entre 45 °C y 64 °C, con incrementos más marcados durante las primeras 600 pasadas y una posterior estabilización. La prueba 5 alcanzó ~65 °C, mientras que en la prueba 2 se observó un ligero descenso al final. El aumento térmico se atribuye a la fricción del rotor, la turbulencia y el colapso violento de cavidades, factores que intensifican la acumulación de calor. Estas condiciones, aunque beneficiosas para ciertos procesos, pueden limitar aplicaciones donde se requiera mantener la estabilidad fisicoquímica o biológica. Los datos correspondientes se presentan en la Tabla 13 del Apéndice D y en la Figura 8, que se muestra a continuación.

#### Figura 8.

*NP VS Temperatura Cavitador Hidrodinámico Rotativo*



### 5.2.1.3 Comparación entre los dos cavitadores para el parámetro de temperatura

Ambos sistemas mostraron incrementos significativos de temperatura, el rotativo alcanzó picos más altos y en menor tiempo, representando un riesgo mayor para procesos que requieran conservar estabilidad fisicoquímica o actividad biológica. El estático, por su parte, presentó un

aumento más progresivo y controlable, pero igualmente relevante cuando se superan umbrales de 45–50 °C.

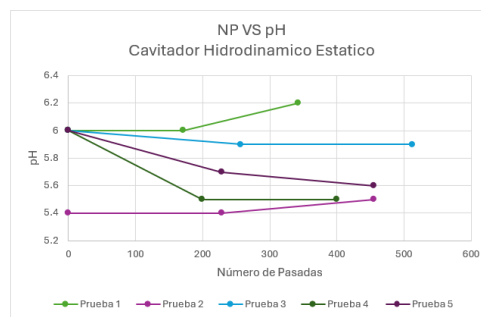
## 5.2.2 pH

### 5.2.2.1 Cavitador Hidrodinámico Estático

El pH se mantuvo estable dentro de un rango ligeramente ácido a neutro (5,4–6,2), con variaciones mínimas entre los puntos iniciales y finales. Este comportamiento se asocia a la menor energía del sistema y al efecto amortiguador de las sales, que estabilizaron el equilibrio ácido-base. Los datos correspondientes a estas pruebas se presentan en la Tabla 7 del Apéndice C. La Figura 9, que se muestra a continuación.

#### Figura 9.

*NP VS pH en el Cavitador Hidrodinámico Estático*



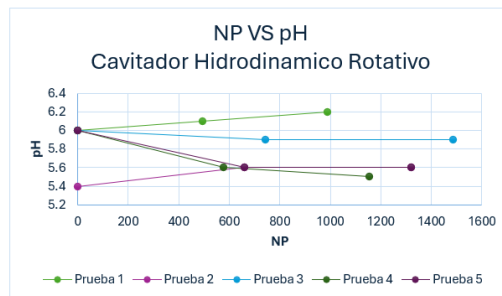
### 5.2.2.2 Cavitador Hidrodinámico Rotativo

El pH también se mantuvo en el rango (5,4–6,2), aunque con tendencia a una ligera disminución al aumentar el número de pasadas, salvo incrementos puntuales. Los resultados sugieren que la cavitación no redujo la carga biodegradable, sino que facilitó la solubilización de compuestos orgánicos, aumentando su disponibilidad para los microorganismos. Los datos

correspondientes a estas pruebas se encuentran consolidados en la Tabla 12 del Apéndice D y en la Figura 10, que se muestra a continuación.

### Figura 10.

*NP VS pH Cavitador Hidrodinámico Rotativo*



#### 5.2.2.3 Comparación entre los dos cavitadores para el parámetro de pH

Ambos cavitadores mantuvieron el pH en un rango similar, ligeramente ácido a neutro (5,4–6,2), sin cambios drásticos durante las pruebas; sin embargo, en el cavitador estático predominaron variaciones mínimas, mientras que en el rotativo se observó con mayor frecuencia una ligera disminución del pH a medida que aumentaba el número de pasadas, salvo casos puntuales de incremento, lo que sugiere que este último favoreció la solubilización de compuestos orgánicos y, potencialmente, la disponibilidad de sustratos para la actividad microbiana posterior al tratamiento.

### 5.2.3 Turbidez

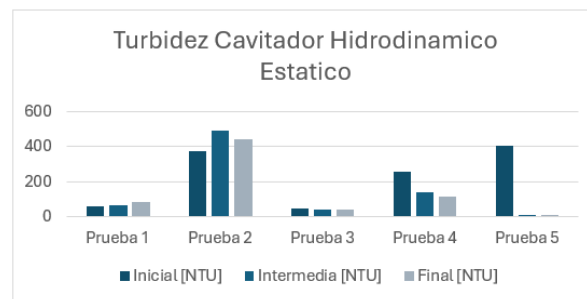
#### 5.2.3.1 Cavitador Hidrodinámico Estático

El cavitador estático presentó una alta sensibilidad a la carga inicial. Con la prueba 1 y 2, la turbidez aumentó, evidenciando fragmentación de sólidos sin adecuada sedimentación. En

cambio, con las pruebas 3, 4 y 5 se obtuvo una alta eficiencia, reduciendo significativamente los valores, con un desempeño sobresaliente especialmente en la prueba 5 (404 a 7,17 NTU), donde la baja carga y la acción de las sales favorecieron la coalescencia y sedimentación de partículas. Los datos correspondientes se presentan en la Tabla 9 del Apéndice C y en la Figura 11, que se muestra a continuación.

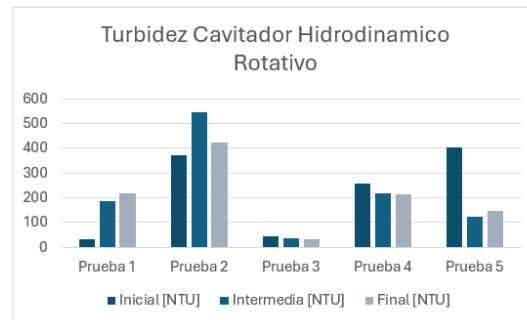
### Figura 11.

#### *Turbidez Cavitador Hidrodinámico Estático*



#### 5.2.3.2 Cavitador Hidrodinámico Rotativo

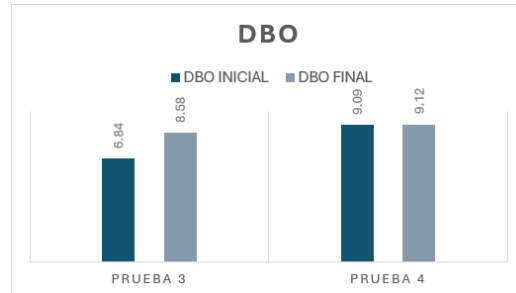
El cavitador rotativo tuvo menor eficiencia, especialmente con cargas elevadas, donde la intensa agitación incrementó la turbidez o produjo reducciones mínimas. En la prueba 3 se obtuvieron resultados más estables, en la prueba 5 (400,8 a 150,2 NTU) fue menos eficiente que el estático, probablemente por la dispersión de partículas ocasionada por su alta turbulencia. Los datos se presentan en la Tabla 14 del Apéndice D y en la Figura 12, que se muestra a continuación; la información detallada sobre las diluciones aplicadas se encuentra en el Apéndice B.

**Figura 12.***Turbidez Cavitador Hidrodinámico Rotativo***5.2.3.3 Comparación entre los dos cavitadores para el parámetro de Turbidez**

La comparación mostró que el cavitador estático tuvo mejor remoción de turbidez en condiciones de baja carga microbiana, destacando en la prueba 5 con una reducción de 404 a 7,17 NTU gracias a la acción coagulante de las sales y su menor turbulencia. En cambio, el rotativo presentó limitaciones, especialmente con cargas altas, y aun con baja carga (400,8 a 150,2 NTU en la prueba 5) su eficiencia fue menor, probablemente por su alta turbulencia que mantiene los sólidos en suspensión.

**5.2.4 DBO**

La Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) es un indicador fundamental de la carga orgánica biodegradable en aguas residuales y de la eficiencia del tratamiento. En este estudio, las pruebas 3 y 4 con el cavitador hidrodinámico estático y agua residual diluida de la industria panificadora mostraron un ligero aumento de DBO tras el tratamiento: de 6,84 a 8,58 mg/L en la prueba 3 y de 9,09 a 9,12 mg/L en la prueba 4. Esto sugiere que la cavitación favoreció la solubilización o fragmentación de materia orgánica, incrementando su disponibilidad para los microorganismos. Los resultados se presentan en la Tabla 11 del Apéndice C y en la Figura 13.

**Figura 13.***DBO Cavitador Hidrodinámico Estático*

Este parámetro no se pudo comparar debido no se contaba con suficientes botellas de oxígeno disuelto

**5.3 Comparación de los dos cavitadores en el parámetro de la reducción logarítmica****5.3.1 Análisis de reducción microbiológica y eficiencia de la remoción**

La eficiencia de remoción porcentual muestra valores elevados (en algunos casos superiores al 99 %), un indicador más riguroso y representativo del grado real de inactivación microbiana es la reducción logarítmica, ya que cuantifica el orden de magnitud de la reducción poblacional inicial respecto a la final. Este parámetro es especialmente útil en contextos donde persisten cargas elevadas de microorganismos tras el tratamiento, a pesar de las aparentes eficiencias altas.

**5.3.1.1 Cavitador Hidrodinámico Estático**

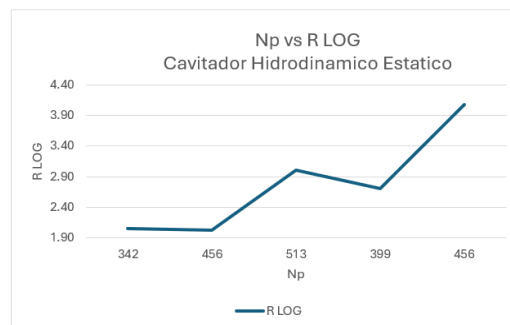
En las pruebas iniciales, con un número de pasadas de 342 y 456, se obtuvieron reducciones logarítmicas de 2.06 y 2.03, respectivamente, lo que refleja una disminución cercana a dos órdenes de magnitud, aunque con presencia significativa de carga microbiana. Al aumentar las pasadas a 513, la R LOG se elevó a 3.00, reflejando una mejora sustancial en la eficiencia del tratamiento.

En la prueba con número de pasadas de 399, la reducción fue de 2.71 log, ligeramente inferior. Sin embargo, en la última prueba, nuevamente con 456 pasadas, pero bajo mejores condiciones operativas, se alcanzó la mayor eficiencia, con una R LOG de 4.07, equivalente a una reducción superior al 99.99 %.

Esto demuestra que, aunque el número de pasadas es determinante, la eficacia del proceso también depende de variables como la dilución salina, la temperatura y la homogeneidad del sistema. Los datos se presentan en la Tabla 10 y la Figura 13 del Apéndice C y en la Figura 14, que se muestra a continuación.

#### Figura 14.

*NP VS Reducción logarítmica Cavitador Hidrodinámico Estático*



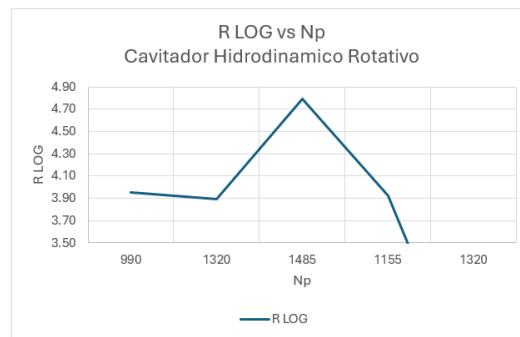
#### 5.3.1.2. Cavitador Hidrodinámico Rotativo

En el cavitador hidrodinámico rotativo, las reducciones logarítmicas mostraron un comportamiento eficiente y mayor estabilidad. Con 990, 1155 y 1320 pasadas, se obtuvieron valores de 3.95, 3.92 y 3.89 log, respectivamente, lo que indica una reducción sostenida de casi cuatro órdenes de magnitud. La mayor eficiencia se alcanzó con 1485 pasadas, logrando una R LOG de 4.79, equivalente a una disminución superior al 99.99 % de la carga microbiana inicial.

Sin embargo, en otra prueba también con 1320 pasadas, la eficiencia se redujo a 2.07 log. Este resultado podría atribuirse a una menor carga microbiana inicial, a condiciones particulares de la muestra o a una posible saturación del sistema, lo que evidencia que incluso en tecnologías altamente eficientes pueden surgir limitaciones bajo ciertos escenarios operativos. Los datos correspondientes a estas pruebas se presentan en la Tabla 15 del Apéndice D y en la Figura 15, que se muestra a continuación.

### Figura 15.

*NP VS Reducción logarítmica Cavitador Hidrodinámico Rotativo*



## 5.4 Evaluación comparativa de cavitación estática y rotativa en la desinfección de aguas residuales de la industria panificadora

La comparación entre el cavitador hidrodinámico rotativo y el estático, presentada en la Figura 16, muestra un desempeño superior del sistema rotativo en términos de reducción logarítmica (R LOG) de la carga microbiológica. El cavitador rotativo alcanzó una media de 3.72 log y un valor máximo de 4.79, lo que equivale a una reducción cercana a cinco órdenes de magnitud. En contraste, el cavitador estático obtuvo una media de 2.77 log y un valor máximo de 4.07, reflejando una menor eficiencia general y mayor variabilidad en los resultados. Además, aunque ambos sistemas muestran cierta dispersión en los datos (desviación estándar de 0.99 para

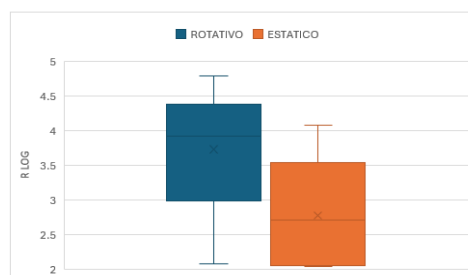
el rotativo y 0.84 para el estático), el rotativo mantuvo valores consistentemente más altos, lo que sugiere una mayor estabilidad operativa y capacidad desinfectante bajo diferentes condiciones.

No obstante, al aplicar una prueba T de Student para dos muestras independientes con corrección de Welch, debido a que no se asumió igualdad de varianzas, se encontró un estadístico t de 1.63 con 7 grados de libertad y un valor p de 0.147. Este valor supera el nivel de significancia del 5%, por lo que no existe evidencia estadística suficiente para rechazar la hipótesis nula de igualdad de medias. Asimismo, el intervalo de confianza del 95% para la diferencia (-0.428 a 2.328) incluye el valor cero, lo que indica que la variación observada podría deberse al azar y no necesariamente a un efecto real, posiblemente influida por el tamaño reducido de la muestra y la dispersión de los datos.

Revisando la tendencia de los datos obtenidos, se evidencia que el cavitador hidrodinámico estático presenta una pendiente más pronunciada en su línea de regresión, lo que podría reflejar un incremento más notable en la reducción logarítmica bajo ciertas condiciones. Sin embargo, se recomienda realizar un mayor número de pruebas para obtener diferencias más representativas y estadísticamente significativas entre ambos sistemas. (Ver Figura 80, Figura 81 y Tabla 19 del Apéndice T)

### Figura 16.

*NP VS Reducción logarítmica en los Cavitadores Hidrodinámicos*



## **5.5 Evaluación de la Viabilidad del Reúso de Agua Tratada según Parámetros Físicoquímicos y Microbiológicos**

El análisis de los resultados obtenidos con ambos cavitadores hidrodinámicos permite determinar su potencial para el reúso de aguas residuales tratadas en riego de cultivos no destinados al consumo directo, en concordancia con los parámetros de la Resolución 1207 de 2014 (pH entre 6.0 y 9.0, conductividad  $<1500 \mu\text{S}/\text{cm}$  y coliformes termo tolerantes  $\leq 1.0\text{E}+5 \text{ NMP}/100 \text{ mL}$ ).

En el cavitador hidrodinámico estático, el pH fluctuó entre 5.4 y 6.2, sin cumplir de forma constante el límite inferior establecido. La remoción de turbidez fue especialmente efectiva en condiciones de alta dilución, destacando la prueba 5 con una disminución de 404 a 7.17 NTU. Aunque este valor no alcanza el estándar recomendado por la OMS para agua de consumo ( $\leq 5 \text{ NTU}$ ), resulta aceptable para riego no restringido. En cuanto a la reducción microbiológica, el sistema alcanzó un máximo de 4.07 log, lo que representa una disminución significativa en la carga de coliformes termo tolerantes.

Por su parte, el cavitador hidrodinámico rotativo presentó un pH más estable a lo largo de las pruebas, pero igualmente inferior al límite normativo mínimo. Su eficiencia en la remoción de turbidez fue menor (ejemplo: en la prueba 5 pasó de 400.8 a 150.2 NTU), posiblemente debido a la mayor turbulencia del flujo, que favorece la permanencia de sólidos en suspensión. Sin embargo, este sistema obtuvo la mayor reducción microbiológica registrada en el estudio, con un valor máximo de 4.79 log, cumpliendo con los requisitos de la Resolución 1207 de 2014 para reúso agrícola en términos de calidad microbiológica (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2014).

## 6 Conclusiones

El tratamiento de aguas residuales de la industria panificadora mediante cavitación hidrodinámica, en configuraciones estática y rotativa, se consolidó como una alternativa viable para la reducción microbiológica, la remoción de turbidez y el control de parámetros fisicoquímicos como pH y temperatura. El desempeño de ambos cavitadores estuvo condicionado por el número de pasadas, el tiempo de operación y la carga contaminante inicial.

La tecnología ARCHR es una alternativa innovadora y eficiente para el tratamiento de aguas residuales, destacándose por su capacidad de desinfección y degradación de compuestos orgánicos mediante cavitación controlada. Su aplicación es especialmente relevante en industrias como la panificadora, donde hay alta carga microbiana y materia orgánica.

Al comparar ambos sistemas de cavitación, se determinó que tanto el cavitador hidrodinámico estático como el rotativo lograron una reducción significativa de la carga microbiana en el agua residual de la industria panificadora. Sin embargo, el cavitador rotativo mostró una leve superioridad en la eficiencia de desinfección bajo las condiciones evaluadas, particularmente con un mayor número de pasadas. Dado el grado de variabilidad observado y la cercanía entre los resultados obtenidos, se recomienda realizar ensayos adicionales que permitan consolidar la comparación y establecer con mayor precisión cuál de los dos sistemas ofrece un desempeño técnico superior.

Durante la evaluación de las variables operativas, se identificó que el número de pasadas fue la principal variable que influyó en la eficiencia del proceso de cavitación, observándose una mejora en la desinfección microbiológica con el aumento de las pasadas. Variables como la

temperatura y el pH mostraron variaciones a lo largo del tratamiento, pero no tuvieron un efecto directo lineal sobre la eficiencia de desinfección. El tipo de cavitador también implicó diferencias en el comportamiento operativo, especialmente en el manejo del caudal y la presión interna.

El pH del agua tratada se mantuvo relativamente estable debido al efecto amortiguador de la mezcla salina utilizada en las diluciones. No obstante, en ambos cavitadores los valores se mantuvieron por debajo del límite mínimo establecido por la Resolución 1207 de 2014 (6.0), lo que indica que no se cumplió con este parámetro normativo.

La cavitación hidrodinámica mostró alto potencial como tratamiento terciario, aunque no siempre cumplió los estándares para reúso en condiciones de alta carga. Se recomienda combinarla con postratamientos y usar sistemas híbridos que integren cavitadores estáticos y rotativos para mejorar la eficiencia y asegurar un reúso seguro del agua.

## 7 Recomendaciones

Es importante utilizar la reducción logarítmica como principal indicador de eficacia microbiológica, dado que proporciona una medición más precisa del comportamiento real del sistema frente a cargas microbianas elevadas, superando la interpretación que ofrece únicamente la eficiencia porcentual.

Implementar un sistema de control térmico, especialmente en el cavitador rotativo, para evitar temperaturas superiores a 60 °C que puedan afectar la estabilidad del proceso o alterar las propiedades del agua tratada.

La optimización de las condiciones de dilución y del tiempo de operación resulta clave, dado que ambos factores influyen directamente en la eficiencia de remoción, particularmente en el desempeño del cavitador estático.

Cuando se observe un aumento en la DBO posterior a la cavitación, es aconsejable implementar una etapa biológica complementaria que permita tratar la materia orgánica residual y garantizar un efluente compatible con los estándares de reúso o vertimiento.

El monitoreo constante de los parámetros fisicoquímicos del sistema, como turbidez, pH y temperatura, es fundamental para detectar desviaciones que puedan comprometer la eficiencia del tratamiento, permitiendo así realizar ajustes oportunos en tiempo real.

La formulación de un modelo cinético simplificado facilitaría la predicción de la eficiencia microbiológica del proceso en función de variables operativas como el número de pasadas, el tiempo de exposición, la temperatura y el tipo de cavitador empleado.

La estandarización de metodologías para el análisis de reducción logarítmica en aguas tratadas por cavitación, junto con un mayor número de réplicas microbiológicas, contribuiría a mejorar la confiabilidad estadística de los datos y a optimizar el diseño experimental en investigaciones futuras.

Se recomienda desarrollar estudios adicionales a escala piloto que integren la cavitación hidrodinámica en simultaneo con procesos de postratamiento, como filtración, desinfección o tratamiento biológico, con el fin de validar su eficiencia en condiciones reales de operación. Esto permitiría garantizar el cumplimiento de la normativa colombiana para reúso agrícola (Resolución 1207 de 2014) y optimizar el sistema como una alternativa sostenible para el tratamiento terciario de aguas residuales industriales, especialmente en escenarios con alta carga contaminante.

Se recomienda continuar con la investigación realizando un mayor número de pruebas bajo diferentes condiciones operativas (tiempo de exposición, número de pasadas, concentraciones microbianas y tipos de dilución), con el fin de optimizar los parámetros del proceso. Asimismo, se sugiere aplicar análisis estadísticos inferenciales que permitan evaluar la significancia de los resultados y replicar el estudio en otros tipos de aguas residuales. Esto facilitará la validación de la tecnología y su eventual escalado a nivel industrial en procesos de reúso de agua.

Se recomienda aplicar diluciones estratégicas del agua residual y utilizar cavitadores estáticos para mejorar la eficiencia en la remoción de sólidos suspendidos en aguas con alta carga orgánica.

### Referencias bibliográficas

- ACIV. (s. f.). AC Ingeniería Virtual Industria 4.0. <https://www.acingenieriavirtual.com>
- ALMAWATECH. (s.f.). Tratamiento de aguas residuales. *ALMAWATECH*.  
<https://www.almawatech.com/es/aguas-residuales/tratamiento-de-aguas-residuales//>
- Álvarez, M., & Domínguez, J. (2015). Tecnologías para el tratamiento de aguas residuales con fines de reúso agrícola. *Revista de Ingeniería Ambiental y Saneamiento*, 9(2), 55–67.
- Avance Jurídico Casa Editorial Ltda. (s. f.). Gestor Normativo de la CRA - Concepto 325 de 2024 SSPD. © Avance Jurídico Casa Editorial Ltda., Comisión de Regulación de Agua Potable y Saneamiento Básico CRA.  
[https://normas.cra.gov.co/gestor/docs/concepto\\_superservicios\\_0000325\\_2024.htm?resultar=CONCEPTO+325+DE+2024](https://normas.cra.gov.co/gestor/docs/concepto_superservicios_0000325_2024.htm?resultar=CONCEPTO+325+DE+2024)
- California Water Boards. (s.f.). Understanding pH.  
[https://www.waterboards.ca.gov/water\\_issues/programs/swamp/docs/cwt/guidance/3140s\\_p.pdf](https://www.waterboards.ca.gov/water_issues/programs/swamp/docs/cwt/guidance/3140s_p.pdf)
- Cevallos, H. A. L., & Flores, E. F. L. (2018). Desinfección bacteriana de aguas residuales utilizando cavitación hidrodinámica a través de un tubo Venturi. *Congreso de Ciencia y Tecnología ESPE*, 13(1).  
<https://doi.org/10.24133/ctespe.v13i1.808>
- de Jorge, L. R. (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>
- Dhanke, P. B., & Wagh, S. M. (2019). Hydrodynamic cavitation as an advanced oxidation process for the degradation of wastewater: A review. *Environmental Technology & Innovation*, *16*, 100493. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2019.100493>
- Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2022, 23 de marzo). Make every drop count: An inclusive, integrated and innovative approach to water scarcity is critical. FAO. [https://www.fao.org/newsroom/detail/FAO-water-scarcity-agriculture-environment/en?utm\\_source=chatgpt.com](https://www.fao.org/newsroom/detail/FAO-water-scarcity-agriculture-environment/en?utm_source=chatgpt.com)
- Flores, E. F. L., & Cevallos, H. A. L. (2018). Desinfección bacteriana de aguas residuales utilizando cavitación hidrodinámica a través de un tubo Venturi. *Congreso de Ciencia y Tecnología ESPE*, *13*(1). <https://doi.org/10.24133/cctespe.v13i1.808>
- Gagol, M., Przyjazny, A., & Boczka, G. (2018). Wastewater treatment by means of advanced oxidation processes based on cavitation – A review. *Chemical Engineering Journal (Lausanne, Switzerland: 1996)*, *338*, 599–627. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.01.049>
- Gostiša, J., Zupanc, M., Dular, M., Širok, B., Levstek, M., & Bizjan, B. (2021). Investigation into cavitation intensity and COD reduction performance of the pinned disc reactor with various rotor-stator arrangements. *Ultrasonics Sonochemistry*, *77*(105669), 105669. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2021.105669>

Importancia del tratamiento terciario de agua residual. (2022, agosto 16). Boss Tech.  
<https://bosstech.pe/importancia-tratamiento-terciario-aguas-residuales/>

International Organization for Standardization. (2024). *ISO 5667-3:2024. Water quality — Sampling — Part 3: Preservation and handling of water samples*. ISO.  
<https://www.iso.org/es/contents/data/standard/08/22/82273.html>

la Agroindustria, C. H. un E. D. la I. y. (s/f). Hydrodynamic Cavitation: Engineering and Agribusiness Approach. Edu.co. Recuperado el 5 de agosto de 2025, de  
<https://revistas.utp.edu.co/index.php/revistaciencia/article/download/19921/14661/69431>

Llano, M., Gómez, H., & Rivas, L. (2014). Análisis de calidad del agua residual mediante turbiedad y sólidos suspendidos. *Revista Colombiana de Química Aplicada*, 46(2), 45-53.

Maceo, R., & Universidad de Cienfuegos. (2013). Caracterización organoléptica de aguas residuales. *Revista Científica de Ingeniería Ambiental*, 5(1), 23–29.

Mane, M. B., Bhandari, V. M., Balapure, K., & Ranade, V. V. (2020). A novel hybrid cavitation process for enhancing and altering rate of disinfection by use of natural oils derived from plants. *Ultrasonics Sonochemistry*, 61(104820), 104820.  
<https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2019.104820>

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2021). Resolución 1256 de 2021 por la cual se reglamenta el reúso y la recirculación de aguas residuales industriales. Retrieved from <https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/12/Resolucion-1256- de-2021.pdf>

- Montgomery, D. C. (2020). *Design and analysis of experiments* (10th ed.). Wiley.  
<https://www.wiley.com/en-us/Design+and+Analysis+of+Experiments%2C+10th+Edition-p-9781119722106>
- Norma de Reúso -. (2021, junio 17). Gov.co. <https://www.minambiente.gov.co/gestion-integral-del-recurso-hídrico/norma-de-reusó/>
- Organización Panamericana de la Salud (OPS), Organización Mundial de la Salud (OMS), & Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS). (2003). *Guía para el uso seguro de aguas residuales y excretas en agricultura*. OPS/OMS/CEPIS. <https://www.paho.org/es/documentos/guia-para-uso-seguro-aguas-residuales-excretas-agricultura>
- Panchal, S., Parikh, P. A., & Majumdar, B. (2018). Water disinfection by hydrodynamic cavitation in a rotor-stator device. *Ultrasonics Sonochemistry*, 48, 130–143.  
<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/30080588/>
- Ruiz, D., González, C., & Romero, F. (2016). Parámetros físicoquímicos en aguas residuales domésticas e industriales. *Revista Iberoamericana de Agua y Saneamiento*, 12(4), 66–74.
- SIGMADAF Clarifiers. (s. f.). *Tratamiento de aguas residuales en la producción de panadería y bollería industrial*. Recuperado de <https://sigmadafclarifiers.com/tratamiento-de-aguas-residuales-en-la-producción-de-panadería-y-bollería-industrial/>

- 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., Xuan, X., Song, Y., Jia, X., Ji, L., Zhao, S., Yong Yoon, J., Chen, S., Liu, J., & Wang, G. (2021). Experimental and numerical studies on the cavitation in an advanced rotational hydrodynamic cavitation reactor for water treatment. *Ultrasonics Sonochemistry*, 70(105311), 105311. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2020.105311>
- Sun, X., Wang, Z., Xuan, X., Ji, L., Li, X., Tao, Y., Boczkaj, 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), 105543. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2021.105543>
- Tuset, S. (2014, septiembre 4). Caracterización del agua residual. *Condorchem Enviro Solutions*. <https://condorchem.com/es/blog/caracterizacion-del-agua-residual/>
- Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. (s.f.). *Caracterización y tratamiento de aguas residuales* [Monografía en línea]. <http://dgsa.uaeh.edu.mx:8080/bibliotecadigital/bitstream/handle/231104/514/Caracterizacion%20y%20tratamiento%20de%20aguas%20residuales.pdf?sequence=1>
- Vera Puerto, I., Jorquera, C., López, D., & Vidal, G. (2016). Humedales construidos para tratamiento y reúso de aguas servidas en Chile: reflexiones. *Tecnología y Ciencia del Agua*, 7(3), 19–35. [https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2007-24222016000300019](https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-24222016000300019)

Walczak, J., Dzido, A., Jankowska, H., Krawczyk, P., & Zubrowska-Sudol, M. (2023). Effects of various rotational speeds of hydrodynamic disintegrator on carbon, nutrient, and energy recovery from sewage sludge. *Water Research*, 243(120365), 120365. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2023.120365>

Apéndice

Apéndice A: Resultados de pruebas preliminares

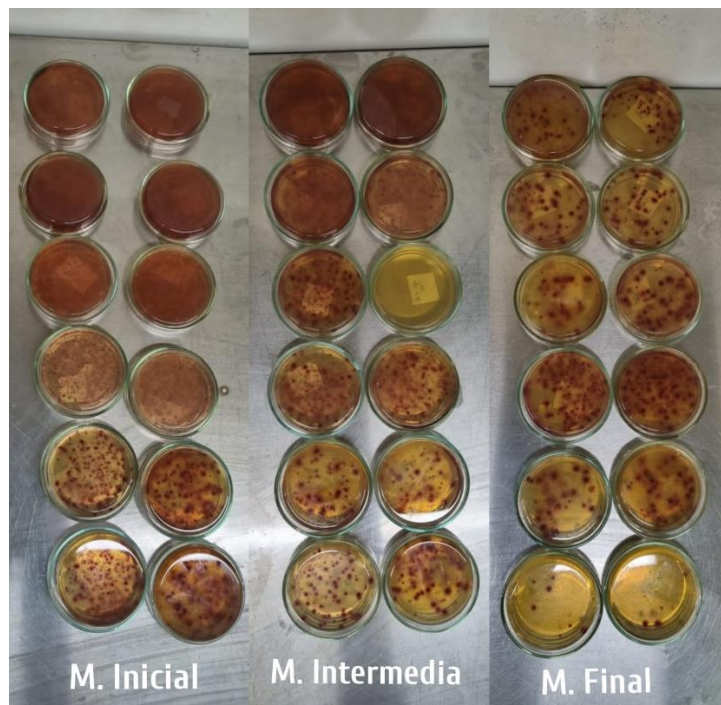
Figura 17.

Resultados de las pruebas preliminares realizadas en el Cavitador Hidrodinámico Estático

Cavitador hidrodinámico estatico														
Registro de Parámetros de Proceso por Fases						Análisis Microbiológico								
Prueba	Fases	Tiempo [min]	NP	pH	Temperatura [C°]	Caja 1	Caja 2	Promedio	N° de colonias	LOG	Eficiencia (in-fi)	Eficiencia (in-int)	Eficiencia (int-fi)	Reduccion LOG
Prueba experimental 1	Inicial	0	0	5.5	25.1	98	90	94	9400000000	9.973	99.543%	94.947%	90.947%	2.34
	Intermedia	120	228.4650533	5.3	46	50	45	47.5	475000000	8.677				
	Final	240	456.9301066	5.4	56.9	37	49	43	43000000	7.633				
Prueba experimental 2	Inicial	0	0	6.4	20.2	300	300	300	3E+11	11.477	90.000%	90.000%	0.000%	1.00
	Intermedia	68	129.4635302	6.2	37.7	300	300	300	30000000000	10.477				
	Final	135	257.023185	6.3	45.5	300	300	300	30000000000	10.477				

Figura 18.

Evidencia fotográfica de la prueba preliminar 1 realizada en el Cavitador Hidrodinámico Estático



**Figura 19.**

*Evidencia fotográfica de la prueba preliminar 2 realizada en el Cavitador Hidrodinámico*

*Estático*



**Apéndice B: Preparación y concentración de soluciones salinas utilizadas en las diluciones (NaCl, CaCl,  $\text{KH}_2\text{PO}_4$ )**

**Tabla 4.**

*Concentración de sales para la dilución en la prueba 1*

Por 14 litros		
NaCl	0.0734	M
CaCl	0.00386	M
$\text{KH}_2\text{PO}_4$	0.00367	M

**Tabla 5.***Concentración de sales para la dilución en la prueba 2*

<b>Por 17 litros</b>		
NaCl	0.0733	M
CaCl	0.00386	M
KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>	0.00368	M

**Tabla 6.***Concentración de sales para la dilución en la prueba 3,4,5.*

<b>Por 22 litros</b>		
NaCl	0.0733	M
CaCl	0.00386	M
KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>	0.00368	M

**Apéndice C: Resultados de pruebas experimentales del cavitador hidrodinámico estático****Tabla 7.***Datos del número de pasadas vs pH de las pruebas realizadas en el cavitador hidrodinámico estático*

<b>Cavitador hidrodinámico estático</b>	
<b>NP</b>	<b>pH</b>
0	6
171	6
342	6.2
0	5.4
228	5.4
456	5.5
0	6

256.5	5.9
513	5.9
0	6
199.5	5.5
399	5.5
0	6
228	5.7
456	5.6

**Tabla 8.**

*Datos del número de pasadas vs temperatura de las pruebas realizadas en el cavitador hidrodinámico estático*

<b>Cavitador hidrodinámico estático</b>	
<b>NP</b>	<b>Temperatura [C°]</b>
0	25.2
171	26.1
342	51.1
0	24.1
228	45.5
456	55.5
0	25.6
256.5	49.4
513	55.3
0	25.7
199.5	48.8
399	57.1
0	24.4
228	44
456	46.7

**Tabla 9.**

*Valores de turbidez en tres fases del tratamiento con cavitación en el cavitador hidrodinámico estático*

<b>Turbidez Cavitador Estático</b>			
<b>Prueba</b>	<b>Inicial [NTU]</b>	<b>Intermedia [NTU]</b>	<b>Final [NTU]</b>
Prueba 1	56.4	61.8	80.8
Prueba 2	370	488	441
Prueba 3	45.1	40.9	38.2
Prueba 4	256	140	112
Prueba 5	404	8.77	7.17

**Tabla 10.**

*Valores de la reducción logarítmica vs número de pasadas de las pruebas realizadas en el cavitador estático*

<b>NP</b>	<b>R LOG</b>
342	2.06
456	2.03
513	3.00
399	2.71
456	4.07

**Tabla 11.**

*Datos DBO de las pruebas 3 y 4 realizadas en el cavitador estático*

	<b>PRUEBA 3</b>	<b>PRUEBA 4</b>
<b>DBO INICIAL</b>	6.84	9.09

**DBO FINAL**                      8.58                      9.12

---

**Figura 20.**

*Resultados de las pruebas experimentales realizadas en el Cavitador Hidrodinámico Estático*

Cavitador hidrodinámico estatico															
Prueba	Registro de Parámetros de Proceso por Fases					Análisis Microbiológico									
	Fases	Tiempo [min]	NP	pH	Temperatura [C°]	Caja 1	Caja 2	Promedio	# de colonias	LOG	Eficiencia (in-fi)	Eficiencia (in-int)	Eficiencia (int-fi)	Reduccion LOG	Turbidez [NTU]
Prueba 1 (3h)	Inicial	0	0	6	25.2	68	58	63	6300000000	9.7993405	99.119%	84.206%	94.422%	2.06	56.4
	Intermedia	90	171.34879	6	26.1	108	91	99.5	995000000	8.9978231					61.8
	Final	180	342.69758	6.2	51.1	53	58	55.5	555000000	7.744293					80.8
Prueba 2 (4h)	Inicial	0	0	5.4	24.1	50	49	49.5	4950000000	9.6946052	99.071%	89.192%	91.402%	2.03	370
	Intermedia	120	228.4650533	5.4	45.5	57	50	53.5	535000000	8.7283538					488
	Final	240	456.9301066	5.5	55.5	44	48	46	460000000	7.6627578					441
Prueba 3 (4:30h)	Inicial	0	0	6	25.6	26	31	28.5	2850000000	8.4548449	99.900%	78.246%	99.540%	3.00	45.1
	Intermedia	135	257.023185	5.9	49.4	65	59	62	620000000	7.7923917					40.9
	Final	270	514.0463699	5.9	55.3	26	31	28.5	285000000	5.4548449					38.2
Prueba 4 (3:30h)	Inicial	0	0	6	25.7	28	36	32	320000000	7.50515	99.803%	99.156%	76.667%	2.71	256
	Intermedia	105	199.9069216	5.5	48.8	17	37	27	2700000	5.4313638					140
	Final	210	399.8138433	5.5	57.1	60	66	63	630000	4.7993405					112
Prueba 5 (4h)	Inicial	0	0	6	24.4	30	48	39	3900000000	9.5910646	99.992%	99.991%	5.714%	4.07	404
	Intermedia	120	228.4650533	5.7	44	30	40	35	3500000	5.544068					8.77
	Final	240	456.9301066	5.6	46.7	35	31	33	3300000	5.5185139					7.17

Donde la caja 2 es el duplicado de la caja 1

**Apéndice D: Resultados de pruebas experimentales del cavitador hidrodinámico rotativo**

**Tabla 12.**

*Datos del número de pasadas vs pH de las pruebas realizadas en el cavitador hidrodinámico rotativo*

Cavitador hidrodinámico rotativo	
NP	pH
0	6
495	6.1
990	6.2
0	5.4
660	5.6
1320	5.6
0	6

742.5	5.9
1485	5.9
0	6
577.5	5.6
1155	5.5
0	6
660	5.6
1320	5.6

**Tabla 13.**

*Datos del número de pasadas vs temperatura de las pruebas realizadas en el cavitador hidrodinámico rotativo*

<b>Cavitador hidrodinámico rotativo</b>	
<b>NP</b>	<b>Temperatura [° C]</b>
0	25.65
495	53.6
990	61.2
0	24.1
660	54.1
1320	45.5
0	25.6
742.5	54.1
1485	54.1
0	25.7
577.5	56.4
1155	61.4
0	24.4
660	59.2
1320	64.4

**Tabla 14.**

*Valores de turbidez en tres fases del tratamiento con cavitación en el cavitador hidrodinámico rotativo*

<b>Turbidez Cavitador Rotativo</b>			
<b>Prueba</b>	<b>Inicial [NTU]</b>	<b>Intermedia [NTU]</b>	<b>Final [NTU]</b>
Prueba 1	30.9	186	219
Prueba 2	370	544	424
Prueba 3	45.1	35.1	33.7
Prueba 4	256	217	212
Prueba 5	404	122	148

**Tabla 15.**

*Valores de la reducción logarítmica vs número de pasadas de las pruebas realizadas en el cavitador rotativo.*

<b>NP</b>	<b>R LOG</b>
990	3.95
1320	3.89
1485	4.79
1155	3.92
1320	2.07

**Figura 21.**

*Resultados de las pruebas experimentales realizadas en el Cavitador Hidrodinámico Rotativo*

Cavitador hidrodinámico rotativo															
Registro de Parámetros de Proceso por Fases						Análisis Microbiológico									
Prueba	Fases	Tiempo [min]	NP	pH	Temperatura [C°]	Caja 1	Caja 2	Promedio	N° de colonias	LOG	Eficiencia (in-fi)	Eficiencia (in-int)	Eficiencia (int-fi)	Reduccion LOG	Turbidez [NTU]
Prueba 1 (3h)	Inicial	0	0	6	25.65	68	58	63	630000000	9.7993405	99.989%	99.857%	92.167%	3.95	30.9
	Intermedia	90	495.595	6.1	53.6	87	93	90	9000000	6.9542425					186
	Final	180	991.189	6.2	61.2	68	73	70.5	705000	5.8481891	99.987%	99.030%	98.677%	3.89	219
	Inicial	0	0	5.4	24.1	50	49	49.5	495000000	9.6946052					370
Prueba 2 (4h)	Intermedia	120	660.793	5.6	54.1	52	44	48	48000000	7.6812412	99.988%	99.848%	92.062%	3.92	544
	Final	240	1321.586	5.6	45.5	63	64	63.5	635000	5.8027737					424
	Inicial	0	0	6	25.6	33	34	33.5	33500000	7.5250448	99.998%	98.821%	99.862%	4.79	45.1
	Intermedia	135	743.392	5.9	54.1	36	43	39.5	395000	5.5965971					35.1
Prueba 3 (4:30 h)	Final	270	1486.784	5.9	54.1	54	55	54.5	545	2.7363965	99.988%	99.848%	92.062%	3.92	33.7
	Inicial	0	0	6	25.7	28	36	32	32000000	7.50515					256
Prueba 4 (3:30h)	Intermedia	105	578.194	5.6	56.4	48	49	48.5	48500	4.6857417	99.154%	88.590%	92.584%	2.07	217
	Final	210	1156.388	5.5	61.4	44	33	38.5	3850	3.5854607					212
Prueba 5 (4h)	Inicial	0	0	6	24.4	30	48	39	390000000	9.5910646	99.154%	88.590%	92.584%	2.07	404
	Intermedia	120	660.793	5.6	59.2	56	33	44.5	445000000	8.64836					122
	Final	240	1321.586	5.6	64.4	31	35	33	33000000	7.5185139					148

Donde la caja 2 es el duplicado de la caja 1

**Apéndice E. Parámetros fisicoquímicos para aguas no domésticas**

**Tabla 16:**

*Parámetros fisicoquímicos y sus valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales de aguas residuales no domésticas – ArnD para las actividades industriales, o comerciales o de servicios diferentes con vertimientos puntuales a cuerpos de agua superficiales.*

Parámetro	Unidades	Valores límites máximos permisibles
<b>Generales</b>		
pH	Unidades de pH	6,00 a 9,00
Demanda Química De Oxígeno (DQO)	mg/L O <sub>2</sub>	150,00
Demanda Bioquímica De Oxígeno (DBO <sub>5</sub> )	mg/L O <sub>2</sub>	50,00
Sólidos Suspendidos Totales (SST)	mg/L	50,00
Sólidos Sedimentables (SSED)	mg/L	1,00
Grasas Y Aceites	mg/L	10,00
Compuestos Semivolátiles Fenólicos	mg/L	Análisis y Reporte
Fenoles Totales	mg/L	0,20
Formaldehído	mg/L	Análisis y Reporte
Sustancias Activas Al Azul De Metileno (SAAM)	mg/L	Análisis y Reporte

<b>Hidrocarburos</b>		
Hidrocarburos Totales (HTP)	mg/L	10,00
Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos (HAP)	mg/L	Análisis y Reporte
BTEX (Benceno, Tolueno, Etilbenceno Y Xileno)	mg/L	Análisis y Reporte
Compuestos Orgánicos Halogenados Absorbibles (AOX)	mg/L	Análisis y Reporte
<b>Compuestos De Fósforo</b>		
Ortofosfatos (P-PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> )	mg/L	Análisis y Reporte
Fósforo Total (P)	mg/L	Análisis y Reporte
<b>Compuestos De Nitrógeno</b>		
Nitratos (N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )	mg/L	Análisis y Reporte
Nitritos (N-NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> )	mg/L	Análisis y Reporte
Nitrógeno Amoniacal (N-NH <sub>3</sub> )	mg/L	Análisis y Reporte
Nitrógeno Total (N)	mg/L	Análisis y Reporte
<b>Iones</b>		
Cianuro Total (CN <sup>-</sup> )	mg/L	0,10
Fluoruros (F <sup>-</sup> )	mg/L	5,0
Sulfatos (So <sub>4</sub> <sup>2-</sup> )	mg/L	250,0
Sulfuros (S <sup>2-</sup> )	mg/L	1,00
<b>Metales Y Metaloides</b>		
Aluminio (Al)	mg/L	Análisis y Reporte
Antimonio (Sb)	mg/L	0,30
Arsénico (As)	mg/L	0,10
Bario (Ba)	mg/L	1,00
Berilio (Be)	mg/L	Análisis y Reporte
Boro (Bo)	mg/L	Análisis y Reporte
Cadmio (Cd)	mg/L	0,01
Cinc (Zn)	mg/L	3,00
Cobalto (Co)	mg/L	0,10
Cobre (Cu)	mg/L	1,00
Cromo (Cr)	mg/L	0,10
Estaño (Sn)	mg/L	2,00
Hierro (Fe)	mg/L	1,00
Litio (Li)	mg/L	Análisis y Reporte
Manganeso (Mn)	mg/L	Análisis y Reporte
Mercurio (Hg)	mg/L	0,002
Molibdeno (Mo)	mg/L	Análisis y Reporte
Níquel (Ni)	mg/L	0,10
Plata (Ag)	mg/L	0,20
Plomo (Pb)	mg/L	0,10
Selenio (Se)	mg/L	0,20
Titanio (Ti)	mg/L	Análisis y Reporte
Vanadio (V)	mg/L	1,00
<b>Otros Parámetros Para Análisis Y Reporte</b>		
Acidez Total	mg/L CaCO <sub>3</sub>	Análisis y Reporte
Alcalinidad Total	mg/L CaCO <sub>3</sub>	Análisis y Reporte
Dureza Cálrica	mg/L CaCO <sub>3</sub>	Análisis y Reporte

Dureza Total	mg/L CaCO <sub>3</sub>	Análisis y Reporte
Color Real	m <sup>-1</sup>	Análisis y Reporte
Medidas De Absorbancia A 436 Nm, 525 Nm Y 620 Nm	m <sup>-1</sup>	Análisis y Reporte

Nota: Adaptado de (MinAmbiente, 2021)

**APÉNDICE F. FILTRADO Y PREPARACIÓN DEL AGUA A TRATAR**

**Figura 22.**

*Primer filtrado del agua*



**Figura 23.**

*Agua con el primer filtrado*



**Figura 24.**

*Agua con segundo filtrado*



**Figura 25.**

*Agua con el último filtrado*



**Figura 26.**

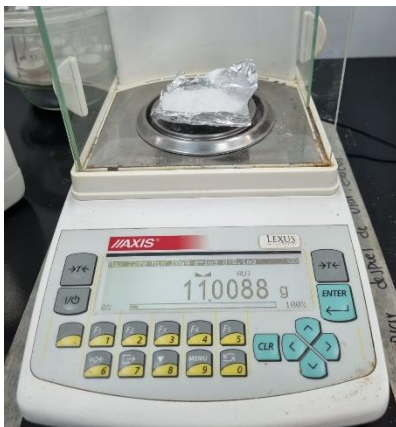
*Carga de los tanques*



**APÉNDICE G. SALES USADAS EN LA DILUCIÓN**

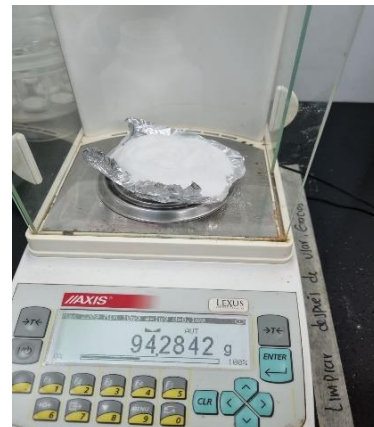
**Figura 27.**

*Peso  $KH_2PO_4$*



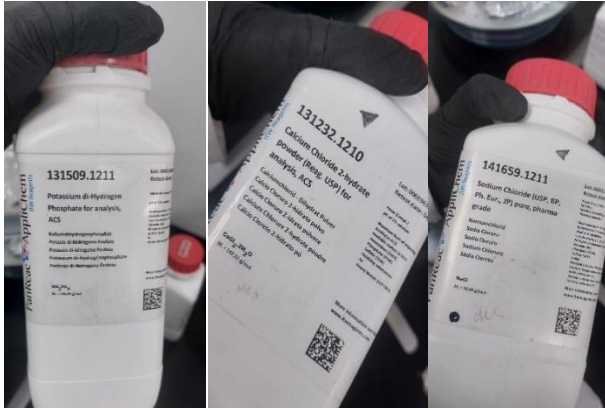
**Figura 28.**

*Peso  $NaCl$*



**Figura 29.**

*Sales utilizadas*



**Figura 30.**

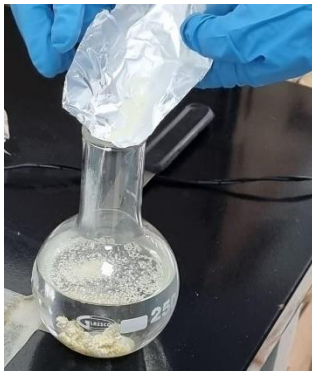
*Peso CaCl*



**Apéndice H. Preparación de agua peptonada y Agar**

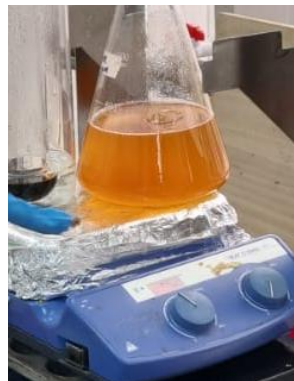
**Figura 31.**

*Preparación del Agua peptona*



**Figura 32.**

*Preparación del Agar*



**Figura 33.**

*Peso de la peptona*



**Figura 34.**

*Material listo para esterilizar*



**Figura 35.**

*Autoclave*



**Apéndice I. Preparación de diluciones e inoculación de muestras**

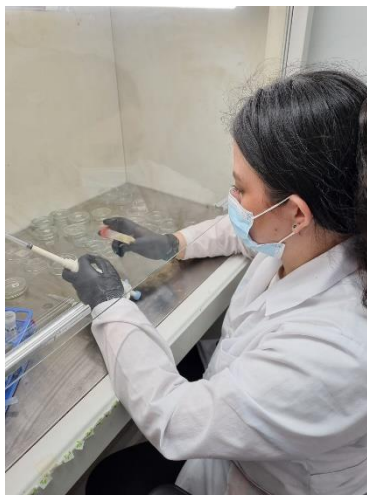
**Figura 36.**

*Adición de agua peptona en los tubos*



**Figura 37.**

*Homogenización de las diluciones*



**Figura 38.**

*Inoculación de muestras*



**Figura 39.**

*Siembra en cajas petri con Agar*



**Apéndice J. Registro de muestras y datos**

**Figura 40.**

*Registro del pH*



**Figura 41.**

*Registro de la turbidez*



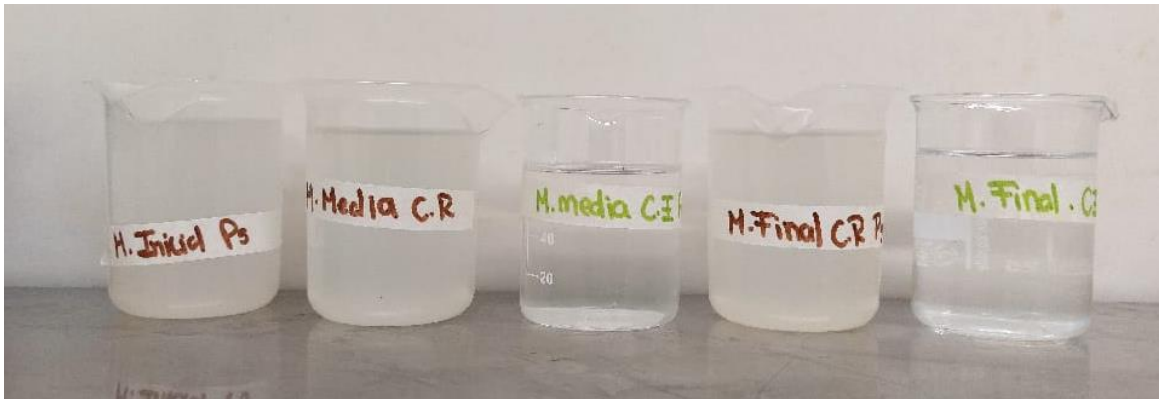
**Figura 42.**

*Registro de la temperatura*



**Figura 43.**

*Toma de Muestras prueba 5*



### Apéndice K. Medición DBO

**Figura 44.**

*Equipo y muestras de DBO*

**Figura 45. Toma inicial de DBO**

**Figura 46.**

*Toma final de DBO*



**Figura 47.**

*Soluciones usadas para la toma de DBO*



**APÉNDICE L. Evidencias fotográficas de las pruebas realizadas en el cavitador hidrodinámico estático.**

**Prueba 1**

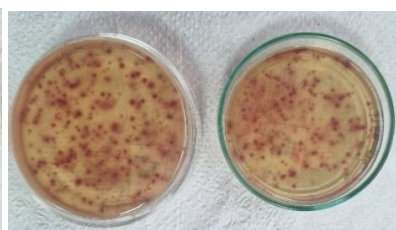
**Figura 48.**

*Muestra inicial, dilución 10<sup>8</sup>*



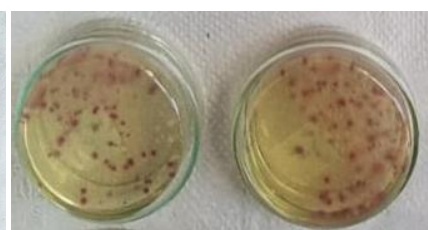
**Figura 49.**

*Muestra intermedia, dilución 10<sup>7</sup>*



**Figura 50.**

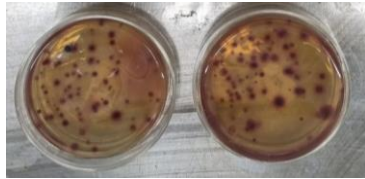
*Muestra final, dilución 10<sup>6</sup>*



**Prueba 2**

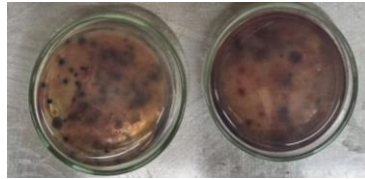
**Figura 51.**

*Muestra inicial, dilución  
10<sup>8</sup>*



**Figura 52.**

*Muestra intermedia,  
dilución 10<sup>7</sup>*



**Figura 53.**

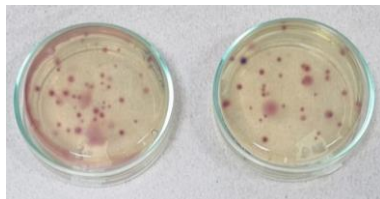
*Muestra final, dilución  
10<sup>6</sup>*



**Prueba 3**

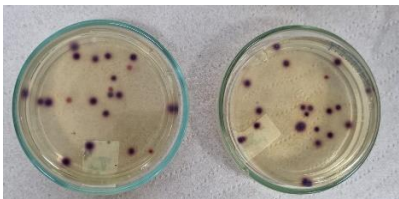
**Figura 54.**

*Muestra inicial, dilución  
10<sup>7</sup>*



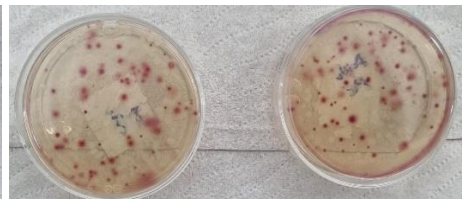
**Figura 55.**

*Muestra intermedia,  
dilución 10<sup>6</sup>*



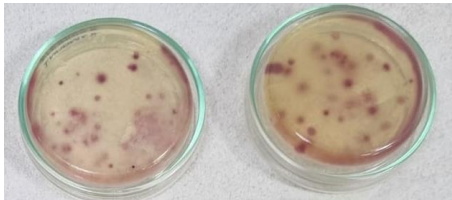
**Figura 56.**

*Muestra final, dilución 10<sup>4</sup>*

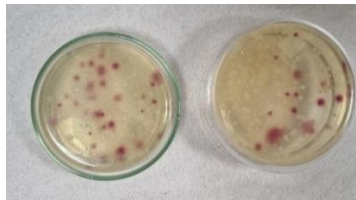


**Prueba 4****Figura 57.**

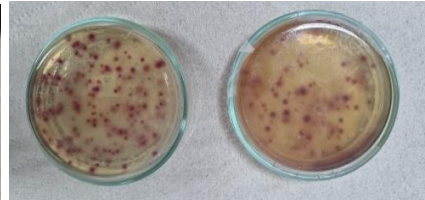
*Muestra inicial, dilución  
 $10^6$*

**Figura 58.**

*Muestra intermedia,  
dilución  $10^4$*

**Figura 59.**

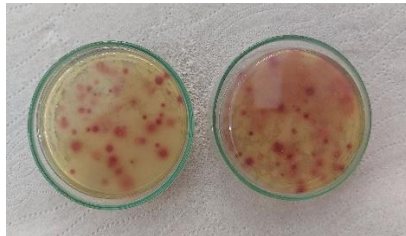
*Muestra final, dilución  $10^3$*

**Prueba 5****Figura 60.**

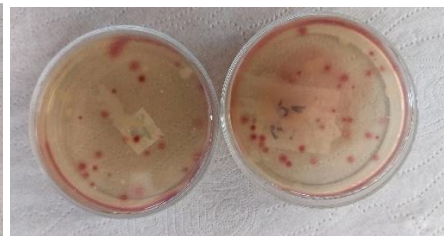
*Muestra inicial, dilución  
 $10^8$*

**Figura 61.**

*Muestra intermedia,  
dilución  $10^4$*

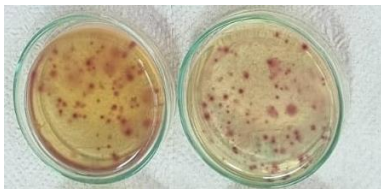
**Figura 62.**

*Muestra final, dilución  $10^4$*



**APÉNDICE M. Evidencias fotográficas de las pruebas realizadas en el cavitador hidrodinámico rotativo.****Prueba 1****Figura 63.**

*Muestra inicial, dilución*  
 $10^8$

**Figura 64.**

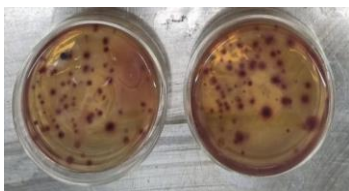
*Muestra intermedia,*  
*dilución  $10^5$*

**Figura 65.**

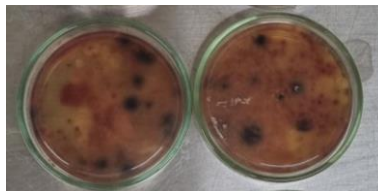
*Muestra final, dilución*  
 $10^4$

**Prueba 2****Figura 66.**

*Muestra inicial, dilución*  
 $10^8$

**Figura 67.**

*Muestra intermedia, dilución*  
 $10^6$

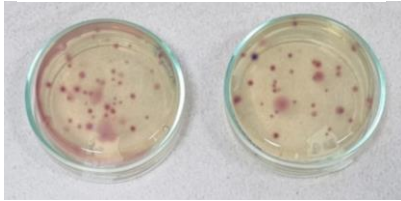
**Figura 68.**

*Muestra final, dilución*  
 $10^4$

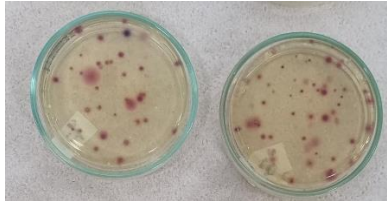


**Prueba 3****Figura 69.**

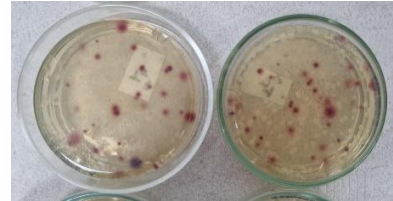
*Muestra inicial, dilución  
 $10^6$*

**Figura 70.**

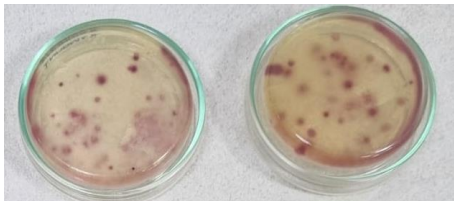
*Muestra intermedia,  
dilución  $10^4$*

**Figura 71.**

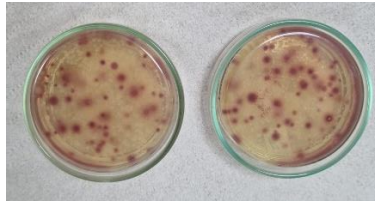
*Muestra final, dilución  $10^1$*

**Prueba 4****Figura 72.**

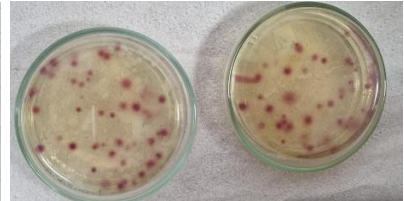
*Muestra inicial, dilución  
 $10^6$*

**Figura 73.**

*Muestra intermedia,  
dilución  $10^3$*

**Figura 74.**

*Muestra final, dilución  $10^2$*



**Prueba 5**

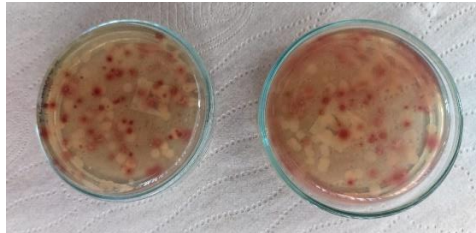
**Figura 75.**

*Muestra inicial, dilución  
10<sup>8</sup>*



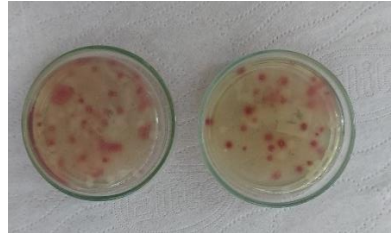
**Figura 76.**

*Muestra intermedia,  
dilución 10<sup>7</sup>*



**Figura 77.**

*Muestra final, dilución  
10<sup>6</sup>*



## APÉNDICE N. Parámetros fisicoquímicos para aguas riego

Figura 78.

*Parámetros de calidad para reúso de aguas residuales tratadas en riego de cultivos no comestibles y áreas verdes*

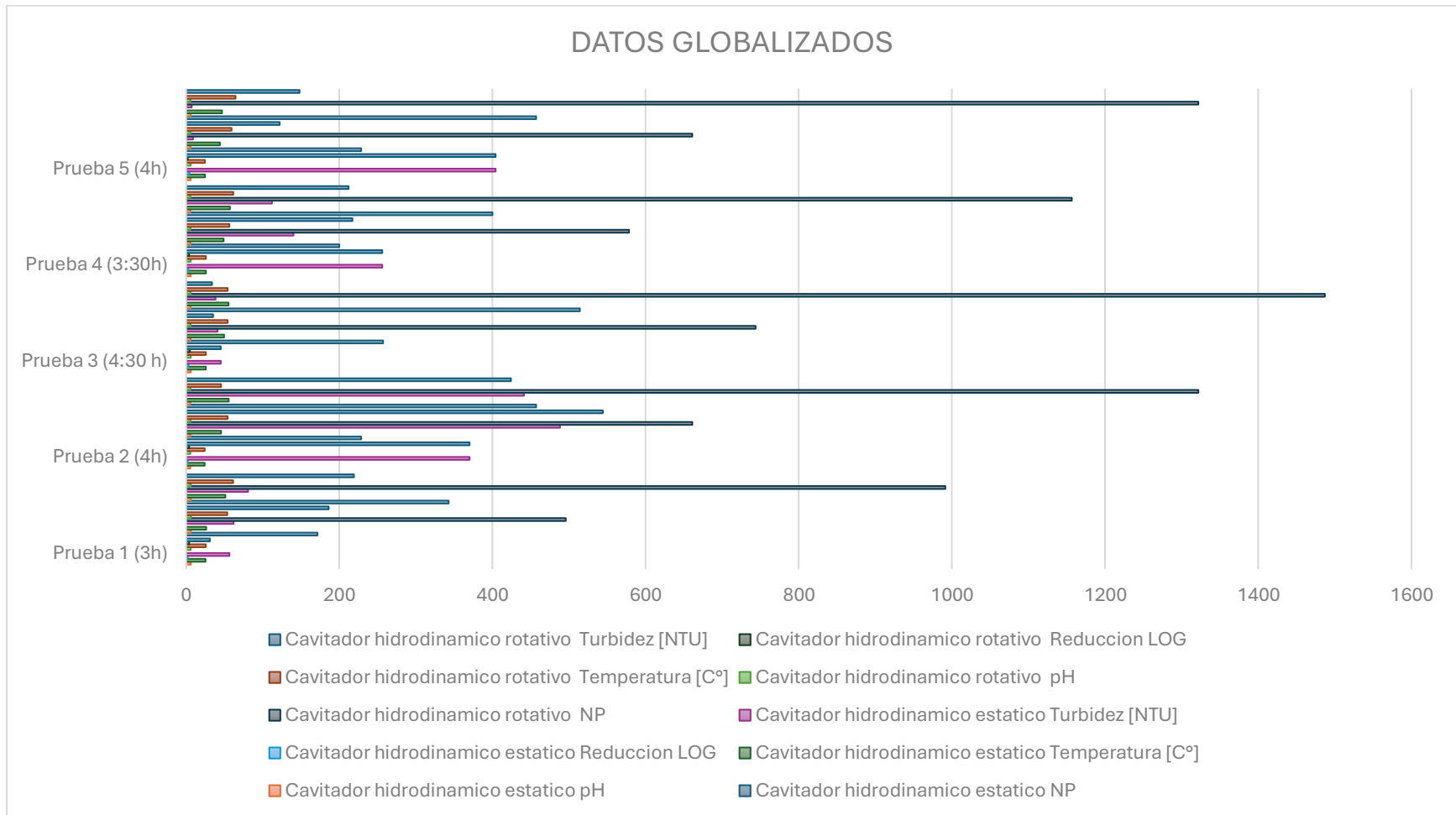
Variable	Unidad de Medida	Valor Límite Máximo Permisible
<b>FÍSICOS</b>		
pH	Unidades de pH	6,0 – 9,0
Conductividad	µS/cm	1.500,0
<b>MICROBIOLÓGICOS</b>		
Coliformes Termotolerantes	NMP/100 mL	1,0*E(+5)
Enterococos Fecales	NMP/100 mL	1,0*E(2)
Helmintos Parásitos Humanos	Huevos y Larvas/L	1,0
Protozoos Parásitos Humanos	Quistes/L	1,0
Salmonella sp	NMP/100 mL	1,0
<b>QUÍMICOS</b>		
Fenoles Totales	mg/L	1,5
Hidrocarburos Totales	mg/L	1,0
<b>Iones</b>		
Cianuro Libre	mg CN <sup>-</sup> /L	0,2
Cloruros	mg Cl <sup>-</sup> /L	300,0
Fluoruros	mg F <sup>-</sup> /L	1,0
Sulfatos	mg SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> /L	500,0
<b>Metales</b>		
Aluminio	mg Al/L	5,0
Berilio	mg Be/L	0,1
Cadmio	mg Cd/L	0,01
Cinc	mg Zn/L	3,0
Cobalto	mg Co/L	0,05
Cobre	mg Cu/L	1,0
Cromo	mg Cr/L	0,1
Hierro	mg Fe/L	5,0
Mercurio	mg Hg/L	0,002
Litio	mg Li/L	2,5
Manganeso	mg Mn/L	0,2
Molibdeno	mg Mo/L	0,07
Níquel	mg Ni/L	0,2
Plomo	mg Pb/L	5,0
Sodio	mg Na/L	200,0
Vanadio	mg V/L	0,1
<b>Metaloides</b>		
Arsénico	mg As <sub>3</sub> /L	0,1
Boro	mg B/L	0,4
<b>No metales</b>		
Selenio	mg Se/L	0,02
<b>Otros parámetros</b>		
Cloro Total Residual (con mínimo 30 minutos de contacto)	mg Cl <sub>2</sub> /L	Menor a 1,0
Nitratos (NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N)	mg/L	5,0

**Nota:** Imagen tomada de (Resolución 1207 de 2014)

**APÉNDICE R. Datos globalizados de las pruebas experimentales con cavitadores hidrodinámicos**

**Figura 79.**

*Comparación global de variables fisicoquímicas y microbiológicas en pruebas con cavitadores hidrodinámicos estático y rotativo*



**APÉNDICE S.** *Preparación de las diluciones, medio de cultivo y siembra de las muestras diluidas***Preparación de las diluciones**

1. Preparar solución de agua peptonada, para este caso fueron 420 ml por 10,71 g de peptona.
2. Colocar las cajas Petri, agua peptona, tubos de ensayo, pipetas y puntas de micropipetas dentro del AUTOCLAVE para proceso de esterilización.
3. Marcar los tubos de ensayo y las cajas Petri de forma ordenada con el número de dilución correspondiente. Para facilitar la identificación de las muestras según el momento del tratamiento, se utilizó un sistema de codificación;  $T_i$  para el tiempo de cavitación inicial,  $T_m$  para el tiempo intermedio y  $T_F$  para el tiempo final. Adicionalmente, se asignó un color específico a cada equipo utilizado, con el propósito de diferenciar claramente los cavitadores empleados durante las pruebas.
4. Agregar 9 mL de solución de agua de Peptona a todos los tubos de ensayo y cerrar el tubo para evitar contaminación.
5. Trasvasar 1 mL de la muestra obtenida del tanque almacenamiento del sistema al primer tubo de ensayo y mezclar para obtener una dilución 1.
6. Repetir el proceso de transferencia del tubo anteriormente mezclado al siguiente tubo para obtener diluciones hasta  $1 \times 10^{-9}$  para la muestra inicial.

7. Realizar el mismo procedimiento con la muestra media y final para cada cavitador llevándolo a la dilución  $1 \times 10^{-7}$  para la muestra media y hasta la dilución  $1 \times 10^{-8}$  para la muestra final.
8. Homogenizar cada dilución agitando suavemente cada muestra 24 veces.

### **Preparación del medio de cultivo y siembra de las muestras diluidas**

- 1) Preparar la solución de Agar como medio de cultivo, para este caso fueron 816 ml por 21,624 g de Agar.
- 2) Calentar la solución de agua peptonada hasta una temperatura aproximada de 90–100 °C, o hasta alcanzar el punto de ebullición, para proceder a agregar el Agar lentamente mientras se agita para asegurar su completa disolución.
- 3) Utilizar el método de siembra por profundidad, transferir 1 ml de cada dilución a una caja petri previamente esterilizada con una micropipeta (MICROPIPETA MICROPETTE DLAB) y tapar la caja para evitar contaminación de la muestra.
- 4) Agregar 9 mL de Agar a cada caja uniformemente.
- 5) Esperar a que el Agar se solidifique antes de incubar las cajas petri.
- 6) Sellar las cajas Petri con Parafilm y colocarlas en posición invertida (boca abajo) dentro del INCUBADOR IN30, con el objetivo de minimizar la condensación sobre la superficie del Agar. Las placas se incubaron a una temperatura de 37 °C durante 24 horas, condiciones óptimas para el crecimiento de los microorganismos.

**Apéndice T: Resultados del aforo para cada cavitador****Tabla 17.***Medición del tiempo y cálculo del caudal en el cavitador hidrodinámico estático*

<b>Cavitador hidrodinámico estático</b>		
<b>Tiempo (s)</b>	<b>Volumen (ml)</b>	<b>Caudal (L/s)</b>
12,28	9000	0,73
12,21	9000	0,74
12,08	9000	0,75
11,24	9000	0,80
11,28	9000	0,80
<b>Promedio</b>	9000	0,76

**Tabla 18.***Medición del tiempo y cálculo del caudal en el cavitador hidrodinámico rotativo*

<b>Cavitador hidrodinámico rotativo</b>		
<b>Tiempo (s)</b>	<b>Volumen (ml)</b>	<b>Caudal (L/s)</b>
3,88	9000	2,32
4,03	9000	2,23
4,15	9000	2,17
3,69	9000	2,44
4,68	9000	1,92
<b>Promedio</b>	9000	2,20

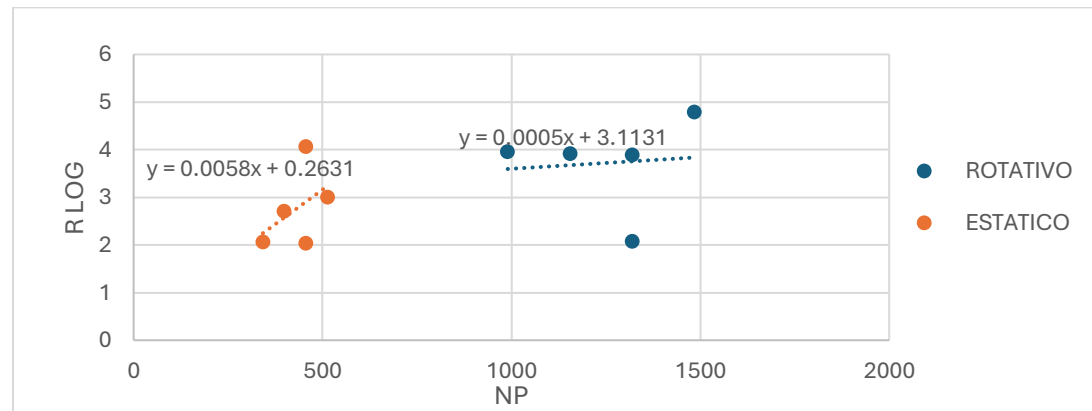
**Tabla 19.**

*Comportamiento del cavitador estático y el cavitador rotativo*

t (min)	t (s) final	np_r	RLOG_r	np_e	RLOG_e
180	10800	990	3,95	342	2,06
240	14400	1320	3,89	456	2,03
270	16200	1485	4,79	513	3
210	12600	1155	3,92	399	2,71
240	14400	1320	2,07	456	4,07

**Figura 80.**

*Tendencia de los Cavitadores*



**Figura 81.***Resultados prueba T-student***Prueba T e IC de dos muestras: RLOG\_r; RLOG\_e****Método** $\mu_1$ : media de población de RLOG\_r $\mu_2$ : media de población de RLOG\_eDiferencia:  $\mu_1 - \mu_2$ *No se presupuso igualdad de varianzas para este análisis.***Estadísticas descriptivas**

Muestra	N	Media	Desv.Est.	Error estándar de la media
RLOG_r	5	3.724	0.999	0.45
RLOG_e	5	2.774	0.836	0.37

**Estimación de la diferencia**

Diferencia	IC de 95% para la diferencia
0.950	(-0.428; 2.328)

**Prueba**Hipótesis nula  $H_0: \mu_1 - \mu_2 = 0$ Hipótesis alterna  $H_1: \mu_1 - \mu_2 \neq 0$ 

Valor T	GL	Valor p
1.63	7	0.147