

Evaluación de la cavitación en el tratamiento de aguas de la industria cafetera con fines de reúso
para AC Ingeniería Virtual

Heidy Vanessa Hernández Hernández y Angie Daniela Patiño Guio

Trabajo de grado para obtener el título de Ingeniero Químico

Modalidad práctica empresarial

Director

Hernando Guerrero Amaya

PhD. Electroquímica, Ciencia y tecnología

Tutor

Helver Crispiniano Álvarez Castro

Ingeniero Químico, MSC, PhD.

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físicoquímicas

Escuela de Ingeniería Química

Bucaramanga

2025

Dedicatoria

Con profunda gratitud, dedico este logro a mi familia, especialmente a mi madre, cuyo amor, sacrificio y apoyo incondicional fueron el pilar fundamental para hacerlo posible. A Dios, por estar siempre presentes en nuestras vidas. A mi hermana, a mi novio y mis amigos, por su compañía, su presencia constante y por brindarme siempre su apoyo. Agradezco también a cada de una de las personas que, de una u otra manera hicieron parte de este proceso. Cada gesto y palabra fueron un valioso aporte en esta etapa de mi vida.

Heidy Vanessa Hernández Hernández

Se dice que detrás de cada logro hay un Dios que lo hizo posible. La verdad es que Él siempre estuvo al frente, iluminando un camino que, aunque incierto, nos inspira a avanzar con fe. Aun sin comprenderlo todo, confiamos en ese plan divino que guía nuestros pasos y que, a través del esfuerzo, la perseverancia y la calma, nos conduce al propósito mayor que nos ha sido reservado. Con profundo amor, quiero dedicar este logro a mis padres y familia, quienes son el pilar de mi inspiración y motivación; a mi pareja, por ser soporte y apoyo incondicional; a mis amigas Sofí, Alexa y Dolly, por ser ese cálido hogar cuando la vida nos llevó lejos de casa; y a todas esas personas especiales que hicieron parte de este lindo camino.

Angie Daniela Patiño Guio

Agradecimientos

Agradecemos profundamente a la Universidad Industrial de Santander, nuestra alma mater, por ser el lugar donde no sólo adquirimos conocimiento, si no donde se nos permitió crecer como personas y profesionales. A la Escuela de Ingeniería Química, por guiarnos con excelencia y compromiso durante todo nuestro proceso. A nuestro director, el profesor Hernando Guerrero, gracias por su guía, por creer en nosotras, por su paciencia y por acompañarnos en este camino. Al Nodo Tecnoparque-SENA Bucaramanga, gracias por abrirnos sus puertas y permitirnos llevar a cabo este proyecto en sus instalaciones. A la estación experimental Cenicafé San Antonio, por su generosa y cálida colaboración al facilitarnos muestras fundamentales en esta investigación. A la empresa AC Ingeniería Virtual, por confiar en nosotras y brindarnos la oportunidad de aplicar lo aprendido en un entorno real. Y, sobre todo, gracias a todas las personas que nos rodearon con su apoyo y afecto. Este trabajo no sería lo que es sin cada uno de ustedes.

Contenido

	Pág.
Introducción.....	12
1. Objetivos.....	14
1.1 Objetivo general.....	14
1.2 Objetivos específicos.....	14
2. Marco conceptual.....	15
2.1 Aguas residuales del café.....	15
2.2 Tratamientos de aguas residuales generadas por la Industria Cafetera	16
2.2.1 Tratamiento terciario	17
2.2.2 Desinfección de aguas residuales del café.....	18
2.3 Normativa	19
2.4 Cavitación.....	19
2.4.1 Cavitación hidrodinámica rotativa	20
2.4.2 Variables operativas implícitas en la cavitación hidrodinámica	21
2.4.3 Cavitación hidrodinámica rotativa como método de desinfección de aguas residuales de la industria cafetera.....	22
2.5 Reúso de aguas residuales	23
3. Estado del arte.....	25
4. Metodología.....	27
4.1 Revisión bibliográfica sobre la tecnología ARHCR en general y su implementación en el tratamiento de aguas residuales en la industria cafetera	27

4.1.1 Exploración de la literatura sobre cavitación en términos generales	27
4.1.2 Revisión bibliográfica acerca de la cavitación aplicada al tratamiento de aguas residuales en la industria cafetera.....	28
4.2 Determinación de variables operativas involucradas en el proceso y elección de variable respuesta	28
4.2.1 Caracterización de la muestra de agua residual	29
4.3 Introducción al sistema y realización de pruebas experimentales exploratorias	29
4.3.1 Montaje del sistema.....	29
4.3.2 Etapas exploratorias.....	30
4.3.3 Análisis microbiológico	31
4.4 Planteamiento del diseño experimental.....	31
4.5.1 Pruebas experimentales	32
5. Resultados y análisis	34
5.1 Resultados pruebas experimentales preliminares.....	34
5.2 Resultados pruebas experimentales siguiendo el diseño experimental.....	35
5.3 Análisis estadístico	36
5.3.1 Comportamiento de la concentración en función del número de pasadas.....	36
5.3.2 Comportamiento de la concentración microbiana en función de las variables operativas...38	
5.3.3 Análisis de correlación entre variables	40
5.3.4 Modelamiento	41
5.5 Resultados y análisis del parámetro EEO.....	43
5.6 Análisis del potencial de reúso.....	45
6. Conclusiones.....	47

7. Recomendaciones.....	49
Referencias Bibliográficas.....	50
Apéndices	57

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. Resultados de pruebas fisicoquímicas de aguas residuales.....	16
Tabla 2. Variables principales y variables ruido presentes en el proceso de cavitación	21
Tabla 3. Tipos de reúso y límites permitidos por la norma 1256 de 2021.....	24
Tabla 4. Resultados de la reducción logarítmica (pruebas preliminares).....	34
Tabla 5. Resultados de la concentración microbiana post tratamiento con cavitación en función del número de pasadas.....	35
Tabla 6. Reducción logarítmica de la carga microbiana según el número de pasadas por el cavitador siguiendo el diseño experimental	35
Tabla 7. Resultados del análisis exploratorio de los datos	37
Tabla 8. Resultados modelamiento	41
Tabla 9. Resultados modelamiento coeficientes de regresión	42
Tabla 10. Parámetro EEO	44
Tabla 11. Límites máximos permisibles para reúso agrícola.....	45

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. Esquema metodológico general del proyecto	27
Figura 2. Esquema del sistema ensamblado de cavitación hidrodinámica rotativa.....	30
Figura 3. Concentración en función del número de pasadas	37
Figura 4. Comportamiento de la concentración microbiana en función de la temperatura.....	38
Figura 5. Comportamiento de la concentración microbiana en función de pH.....	39
Figura 6. Comportamiento de la concentración microbiana en función de la corriente eléctrica .	39
Figura 7. Análisis de correlación de las variables principales con las variables ruido	41

Lista de Apéndices

	Pág.
Apéndice A. Caracterización fisicoquímica aguas residuales.	57
Apéndice B. Tratamientos de aguas residuales y sus principales objetivos.	58
Apéndice C. Tecnologías tratamiento terciario.....	59
Apéndice D. Microorganismos infecciosos presentes en las aguas residuales del café.....	61
Apéndice E. Parámetros fisicoquímicos para vertimientos y reúso de agua residual del café.....	62
Apéndice F. Criterios de calidad.....	63
Apéndice G. Recopilación de datos	64
Apéndice H. Toma de muestra y Pretratamiento del agua residual.	65
Apéndice I. Preparación y medición de medio de cultivo y Agua peptonada.....	66
Apéndice J. Esterilización y autoclave.....	67
Apéndice K. Puesta en marcha de prueba experimental	68
Apéndice L. Control y toma de datos en las variables trabajadas	69
Apéndice M. Adecuación del espacio de trabajo.....	70
Apéndice N. Preparación de diluciones y siembra	71
Apéndice O. Incubación de muestras.....	72
Apéndice P. Resultados medio de cultivo	73
Apéndice Q. Análisis estadístico haciendo uso del programa.....	74
Apéndice R. Procedimiento para la preparación de diluciones seriadas.....	75
Apéndice S. Procedimiento de siembra mediante vertimiento en placa (método de profundidad).....	74

Resumen

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

Autores: Heidy Vanessa Hernández Hernández, Angie Daniela Patiño Guio**.

Palabras claves: Cavitación hidrodinámica rotativa, *Escherichia coli*, vertimientos y reúso de agua, aguas residuales, tratamiento terciario, desinfección.

Descripción:

El tratamiento y reúso de las aguas residuales del beneficio húmedo del café representa un reto ambiental importante, pero también una oportunidad para fomentar prácticas sostenibles en la agroindustria. Este estudio, evaluó la eficiencia de la cavitación hidrodinámica rotativa asistida (ARHCR) como tecnología de tratamiento terciario orientada a la desinfección de aguas residuales provenientes del procesamiento del café. El análisis se centró especialmente en la reducción de *Escherichia coli* y en el cumplimiento de los parámetros fisicoquímicos exigidos por la normativa colombiana para vertimientos y reúso de agua.

Para ello, se realizaron ensayos experimentales con sus respectivas réplicas, con variaciones en el número de pasadas del fluido por el sistema. Los resultados revelaron un aumento del pH lo que contribuye a mejorar la estabilidad y desinfección del sistema. En cuanto a la desinfección, se observó una reducción de *Escherichia coli*, con disminuciones promedio de 2 log y hasta 7 log (99-99.9999%), siendo el umbral aceptado por la OMS (3 a 6 log de reducción) para ser considerado un método eficaz y seguro de desinfección para el reúso del agua en aplicaciones como el riego agrícola no destinado al consumo humano.

Este estudio demostró que la tecnología ARHCR es una alternativa eficiente, ambientalmente sostenible y alineada con la legislación vigente colombiana promoviendo el cierre de ciclos del agua y contribuyendo de manera significativa a mitigar el impacto ecológico asociado con la producción cafetera, abriendo nuevas perspectivas para la innovación tecnológica en el manejo del recurso hídrico agroindustrial.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas Escuela de Ingeniería Química Director: Hernando Guerrero Amaya PhD. Electroquímica, Ciencia y tecnología Tutor Helver Crispiniano Álvarez Castro Ingeniero Químico, MSC, PhD.

Abstract

Title: Evaluation of cavitation in the treatment of water from the coffee industry for reuse purposes for AC Virtual Engineering*

Authors: Heidy Vanessa Hernández Hernández, Angie Daniela Patiño Guio**.

Keywords: Rotary hydrodynamic cavitation, Escherichia coli, water discharge and reuse, wastewater, tertiary treatment, disinfection.

Description

The treatment and reuse of coffee wet mill wastewater represents an important environmental challenge, but also an opportunity to promote sustainable practices in the agroindustry. This study evaluated the efficiency of assisted rotary hydrodynamic cavitation (ARHCR) as a tertiary treatment technology for the disinfection of coffee processing wastewater. The analysis focused especially on the reduction of Escherichia coli and compliance with the physicochemical parameters required by Colombian regulations for water discharge and reuse.

For this purpose, experimental tests were carried out with their respective replicates, with variations in the number of passes of the fluid through the system. The results revealed an increase in pH, which contributes to improving the stability and disinfection of the system. Regarding disinfection, a reduction of Escherichia coli was observed, with average reductions of 2 log and up to 7 log (99-99.9999%), being the threshold accepted by the WHO (3 to 6 log reduction) to be considered an effective and safe method of disinfection for water reuse in applications such as agricultural irrigation not intended for human consumption.

This study demonstrated that the ARHCR technology is an efficient and environmentally sustainable alternative, aligned with current Colombian legislation, promoting the closing of water cycles and contributing significantly to mitigate the ecological impact associated with coffee production, opening new perspectives for technological innovation in the management of agro-industrial water resources.

* Project of Grade

** Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas Escuela de Ingeniería Química Director: Hernando Guerrero Amaya PhD. Electroquímica, Ciencia y tecnología Tutor Helver Crispiniano Álvarez Castro Ingeniero Químico, MSC, PhD.

Introducción

La ingeniería computacional se ha consolidado como un elemento fundamental para la optimización de procesos industriales mediante técnicas como el modelado y simulación. En este contexto, AC Ingeniería virtual se especializa en simulación numérica, prototipado y automatización, destacándose en la implementación de tecnologías innovadoras. Una de estas tecnologías emergentes es la cavitación hidrodinámica, cuyo potencial está siendo evaluado como tratamiento terciario de aguas residuales.

Este estudio aborda específicamente el tratamiento de aguas residuales provenientes de la industria cafetera, sector estratégico para la economía y la sociedad colombiana. Según la Unidad de Planificación Rural Agropecuaria (UPRA), *“Colombia es el tercer país mayor productor de café a nivel mundial. Con más de 845.000 hectáreas que se dedican a la producción de café, en manos de 550.000 familias cafeteras”*. Sin embargo, esta actividad también genera impactos ambientales significativos, derivados principalmente de alta carga orgánica y la presencia de compuestos complejos en los efluentes. Por consiguiente, una gestión adecuada del recurso hídrico es indispensable para garantizar la sostenibilidad del sector.

Actualmente, existen diversos métodos para tratar estas aguas residuales. Por ejemplo, el Sistema Modular de Tratamiento Anaerobio (SMTA), diseñado por Cenicafé, ha demostrado eficacias superiores al 80% en reducción de la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) (Federación Nacional de Cafeteros de Colombia, 2006). *“Este sistema consiste en dos unidades específicas para separar fases de la digestión anaerobia: un reactor Hidrolítico/ Acido génico (RHA) y un reactor Metanogénico (RM)”* lo que facilita la descomposición de la materia orgánica

en ausencia de oxígeno y reduce significativamente la carga contaminante Federación Nacional de Cafeteros de Colombia, 1999, pág. 8).

Por otra parte, Cenicafé también investigó métodos naturales como los filtros verdes, que aprovechan la capacidad del suelo, vegetación y microorganismos para remover contaminantes, alcanzando niveles del 80% de eliminación en Demanda Química de Oxígeno (DQO) y Sólidos Suspendidos Totales (SST) en efluentes pretratados. Según la (Unidad de Planificación Rural Agropecuaria - UPRA, s.f.), este método consiste “en aplicar directamente el efluente en una superficie con vegetación, preferentemente con alta permeabilidad, aprovechando la capacidad suelo-vegetación-microorganismos para actuar como un reactor natural, degradando gran parte de los contaminantes orgánicos presentes en el agua”. Aunque eficaz y de bajo consumo energético, este sistema requiere una superficie considerable por unidad de agua tratada.

Frente a la limitación mencionada, la cavitación hidrodinámica surge como una alternativa para complementar los tratamientos existentes. Este fenómeno físico, basado en la formación y colapso de microburbujas por variaciones locales de presiones, genera en su implosión condiciones extremas de temperatura y presión. Tales condiciones provocan, simultáneamente, efectos mecánicos (ondas de choque) y efectos químicos (formación radicales hidroxilos), capaces de oxidar y degradar contaminantes orgánicos, así como inactivar microorganismos. (Gostiša, 2021).

En consecuencia, este proyecto tiene como propósito analizar el desempeño de la cavitación hidrodinámica como método de desinfección terciaria en el tratamiento de aguas residuales de la producción cafetera, con el objetivo específico de mejorar el reúso del agua y reducir significativamente el impacto ambiental asociado.

1. Objetivos

1.1 Objetivo general

Evaluar la cavitación hidrodinámica rotativa como tratamiento terciario para la desinfección de aguas residuales de la industria cafetera, identificando las principales variables operativas, determinando su influencia en la inactivación microbiana y proponiendo alternativas de reúso agroindustrial a partir de las aguas previamente tratadas.

1.2 Objetivos específicos

Determinar las principales variables operativas de la tecnología de cavitación hidrodinámica rotativa (ARHCR) e identificar su influencia en la desinfección de aguas residuales de la industria cafetera.

Realizar un diseño experimental para evaluar la eficiencia de la tecnología ARHCR en la desinfección de aguas residuales de la industria cafetera.

Proponer alternativas de reúso agroindustrial, conforme a la normativa ambiental vigente en Colombia, para las aguas residuales previamente tratadas de la industria cafetera.

2. Marco conceptual

El tratamiento adecuado de las aguas residuales provenientes del beneficio húmedo del café es fundamental para mitigar los impactos ambientales negativos asociados a esta actividad agrícola. Estas aguas, llamadas aguas miel, se caracterizan por presentar una elevada carga de materia orgánica que, si no se gestionan correctamente, pueden contaminar los cuerpos de agua y el suelo circundante (Cenicafé,2008).

2.1 Aguas residuales del café

Las aguas mieles son residuos líquidos generados durante el proceso de beneficio húmedo del café, el cual abarca las etapas de despulpado, fermentación y lavado de los granos. Estas aguas se caracterizan por su aspecto viscoso y color marrón claro, con alta concentración de azúcares y materia orgánica, características que les confieren un sabor ligeramente dulce (Federación Nacional de Cafeteros - CENICAFÉ, 2015). Desde el punto de vista ambiental, los parámetros fisicoquímicos de estas aguas resultan preocupantes. Presentan una Demanda Química de Oxígeno (DQO) superior a la de las aguas residuales domésticas, con valores que fácilmente exceden los 1500 mg/L, además de un pH ácido, generalmente inferior a 5, lo cual las clasifica como un efluente altamente contaminante en caso de ser vertido sin tratamiento previo en cuerpos de agua o suelos agrícolas (Vega Serrano, 2023). Además, presentan una conductividad elevada fruto de sales arrastradas del terreno, y durante su degradación generan olores ofensivos, todo lo cual limita su posible reúso en actividades agroindustriales (Zuluaga & Zambrano, 1993; WCS Colombia, 2022).

En la tabla 1 se presenta una caracterización fisicoquímica de las aguas mieles posterior al proceso de fermentación, evidenciando pH ácido, alta carga orgánica y sólidos disueltos, condiciones asociadas al oscurecimiento del agua, generación de olores y potenciales impactos ambientales negativos en ecosistemas acuáticos.

Tabla 1

Resultados de pruebas fisicoquímicas de aguas residuales del café

Característica	Fermentación 24 horas	Impacto ambiental
pH	4,025 ± 0,035	Acidificación del agua, daños a la vida acuática.
Conductividad (µS/cm)	3,035 ± 0,035	Alta concentración de sales y minerales disueltos puede afectar la vida acuática y la irrigación de cultivos.
Oxígeno disuelto (mg/L)	1,25 ± 0,070	Requiere alta demanda de oxígeno llegando a causar muerte de peces u otros organismos.
Cromo (mg/L)	< 0,02	Tóxicos para los ecosistemas acuáticos.
Amonio (mg/L)	<0,1	
Nitrógeno total (mg/L)	135	Puede causar eutrofización (crecimiento excesivo de algas).
DQO (mg/L)	> 1500	Alta concentración de materia orgánica en el agua.
Sólidos volátiles (g/L)	26,41 ± 0,028	Alta concentraciones de sólidos al sedimentarse pueden crear una capa en la superficie de ríos reduciendo la penetración de luz solar afectando la fotosíntesis en plantas acuáticas.
Sólidos minerales (g/L)	3,29 ± 0,070	
Sólidos totales (g/L)	29,705 ± 0,091	
Acidez volátil (mg ácido acético/L)	90	Alta acidez afecta el pH del agua y el suelo, causando daños en los ecosistemas acuáticos y terrestres.
Cloruros (mg/L)	20 ± 1,2	Tóxicos para algunas especies y corrosión de tuberías.
Fósforo soluble (mg/L)	15,157 ± 0,88	Crecimiento excesivo de algas.
Color (ΔE)	8,11	Reduce la penetración de la luz solar en el agua y fotosíntesis de plantas acuáticas.

Adaptado de Torres-Valenzuela (2019)

2.2 Tratamientos de aguas residuales generadas por la Industria Cafetera

El sistema convencional de tratamiento de aguas residuales integra procesos físicos, químicos y biológicos con el fin de eliminar sólidos, materia orgánica y, en algunos casos, nutrientes presentes en el efluente. Su propósito central es reducir la contaminación antes del vertimiento o su posible reúso. Este tratamiento se organiza en niveles de eficiencia progresiva: tratamiento preliminar, orientado a la retención de sólidos gruesos, arena y grasas; tratamiento primario, enfocado en la reducción de sólidos sedimentables y materiales flotantes; tratamiento secundario, que remueve materia orgánica mediante procesos biológicos, generalmente aerobios; y tratamiento terciario, destinado a la eliminación de nutrientes y patógenos restantes. Cuando se requiere, se añade una etapa final de desinfección para garantizar la inocuidad del agua. Una representación gráfica de estos niveles y sus objetivos específicos se presenta en el (Apéndice B).

2.2.1 Tratamiento terciario

Este tratamiento representa la última etapa del proceso de desinfección de aguas residuales, cuyo objetivo principal es eliminar contaminantes remanentes que no fueron removidos en las fases anteriores, como nitrógeno y fósforo, para cumplir con los parámetros normativos exigidos antes de su vertimiento en cuerpos de agua.

En esta etapa final, se utiliza una combinación de tecnologías avanzadas que optimizan la eliminación de contaminantes persistentes, logrando así una mayor purificación del agua y garantizando su calidad y seguridad para posibles usos posteriores. La elección adecuada de la tecnología a emplear depende de muchos factores, como el costo operativo, tamaño de la instalación y disponibilidad de recursos, entre otros. En el (Apéndice C) del presente estudio se incluyen dos tablas relevantes, la primera presenta algunas de las principales tecnologías

disponibles, explicando brevemente cada una, mientras que la segunda es una matriz comparativa que evalúa diversos aspectos técnicos, operativos, económicos y ambientales específicos de cada tecnología aplicable al tratamiento de aguas residuales provenientes del lavado de café.

Entre las tecnologías analizadas, se destaca particularmente la cavitación hidrodinámica, por su innovación y potencial como método ambientalmente sostenible, ya que no requiere empleo de productos químicos durante su operación, además alcanza tasas elevadas de desinfección, entre 99% y 99.9% destacándose por no generar subproductos peligrosos, lo que la convierte en una alternativa beneficiosa.

2.2.2 Desinfección de aguas residuales del café

La desinfección es el proceso que tiene como objetivo eliminar o inactivar los microorganismos presentes en el agua, constituyendo una etapa fundamental para asegurar la calidad, proteger la salud pública y mitigar el impacto ambiental. Esta etapa permite reutilizar el recurso hídrico en otras aplicaciones, como áreas públicas, cultivos agrícolas o recarga de acuíferos (Valero et al, 2015; Henao et al 2018 a). Particularmente en la industria cafetera, el procesamiento del café y sus subproductos, especialmente la pulpa, contribuyen a la formación de grandes cargas orgánicas en estas aguas residuales, incluyendo hongos y bacterias. Estas aguas presentan una notable presencia de aerobios mesófilos, coliformes totales y fecales, enterococos, así como mohos y levaduras, con concentraciones que alcanzan hasta 10^7 UFC/ml. También presencia de patógenos como *Salmonella-Shigella*. La identificación y caracterización específica de estos microorganismos descrita en el (Apéndice D), permite entender mejor los retos particulares que implica el tratamiento de este tipo de aguas residuales.

2.3 Normativa

En Colombia, la normativa ambiental establece lineamientos técnicos y legales para el tratamiento y reúso de aguas residuales. La resolución 0631 de 2015 establece los valores máximos permitidos para vertimientos, especialmente en sector agroindustriales, incluyendo variables como DBO, DQO, SST y la presencia de microorganismos como *Escherichia coli*. En particular, el Capítulo VI de esta resolución hace énfasis específico en actividades agroindustriales y ganaderas. (Min Ambiente, 2015^a) (ver Apéndice E).

Adicionalmente, el Decreto 3930 de 2010, junto con las Resoluciones 1207 de 2014 (ver Apéndice F) y 1256 de 2021 (ver tabla 2), especifican claramente las condiciones técnicas necesarias para reutilizar aguas residuales tratadas. Estas regulaciones establecen los usos permitidos, como el riego agrícola o el uso industrial, y determinan los límites microbiológicos según cada aplicación. Por ejemplo, para el riego agrícola en cultivos destinados al consumo humano crudo, la concentración máxima permitida de coliformes fecales es de 200 NMP/100 ml, mientras que, para cultivos industriales o pasturas, el límite es de 10.000 NMP/100 ml. De este modo, el marco normativo vigente define los estándares de calidad exigidos según el tipo de reúso, y establece criterios esenciales para evaluar la eficacia y viabilidad técnica de tecnologías aplicadas al tratamiento de aguas residuales.

2.4 Cavitación

La cavitación es un fenómeno termodinámico y mecánico que se produce cuando un líquido es sometido a una rápida disminución de presión por debajo de su presión de vapor, lo que

induce la formación de cavidades o burbujas llenas de vapor en el seno del fluido. Estas burbujas, altamente inestables, colapsan de forma violenta al trasladarse hacia zonas de mayor presión, liberando una cantidad significativa de energía en forma de ondas de choque, microchorros, radiación acústica y altas temperaturas locales, que pueden superar los 5 000 K y alcanzar presiones de hasta 1 000 atm en escalas microscópicas (Brennen, 2013; Franc & Michel, 2006).

La energía liberada durante el colapso de las burbujas genera fuerzas de cizallamiento y microchorros que pueden fragmentar contaminantes orgánicos y dañar la estructura de los microorganismos patógenos (Arndt, 2002; Young, 1989). En este contexto, la cavitación combina la acción mecánica con la posible formación de especies reactivas que favorecen procesos de oxidación avanzada. Lo que la convierte en una tecnología emergente con alto potencial para el tratamiento terciario de aguas residuales y la generación de efluentes aptos para su reúso (Zheng et al., 2022).

2.4.1 Cavitación hidrodinámica rotativa

La cavitación hidrodinámica rotativa es una técnica avanzada de generación de cavitación que se basa en la interacción entre un rotor y un estator dentro de un reactor de flujo continuo. A diferencia de los sistemas convencionales, que emplean dispositivos como orificios o venturis, los reactores rotativos (ARHCR) inducen cavitación mediante fuerzas de corte y presión generadas por la rotación de superficies ranuradas o perforadas entre el rotor y el estator (Petkovšek et al., 2013; Gostiša et al., 2021). Estas unidades de generación, denominadas *Cavitation Generation Units* (CGUs, por sus siglas en inglés), producen fluctuaciones de presión periódicas que favorecen

de manera más eficiente y controlada la nucleación, el crecimiento y el colapso de burbujas (Sun et al., 2020; Šarc et al., 2018).

El diseño tipo rotor-estator permite alcanzar una mayor frecuencia y densidad de burbujas, intensificando así la energía liberada en cada colapso. Este fenómeno conlleva un incremento significativo en la formación de especies reactivas como radicales hidroxilos ($\bullet\text{OH}$) e hidrógeno ($\bullet\text{H}$), así como la generación de microondas de alta energía, lo que favorece procesos de oxidación avanzada y desinfección eficaces en aguas residuales (Petkovšek et al., 2013; Bandala & Rodríguez-Narváez, 2019). Adicionalmente, los sistemas rotativos han demostrado una mayor eficiencia energética en comparación con los sistemas estáticos, lo que permite su aplicación en escalas piloto e industrial con menor consumo energético (Gostiša et al., 2021; Šarc et al., 2018).

2.4.2 Variables operativas implícitas en la cavitación hidrodinámica

En la tabla 1 se describen las variables que influyen en el proceso de cavitación hidrodinámica.

Tabla 2.

Variables principales y variables ruido presentes en el proceso de cavitación

Variable	Descripción	Influencia en el proceso
Velocidad de rotación	Velocidad angular con el que el fluido circula dentro del reactor.	Un aumento en la velocidad mejora la formación de burbujas de cavitación, lo que puede potenciar el proceso de desinfección al aumentar la energía liberada.
Número de pasadas(ciclos)	Número de veces que el fluido pasa por el sistema durante el tratamiento.	Incrementa la exposición de los contaminantes a condiciones extremas, mejora la uniformidad del tratamiento y reduce el consumo energético global.
Temperatura del fluido	Temperatura del agua en proceso.	La cavitación se intensifica con el aumento de temperatura hasta cierto punto ($\sim 50\text{-}70\text{ }^\circ\text{C}$);

		temperaturas más altas pueden generar burbujas menos efectivas.
Presión interna	Nivel de presión alcanzado dentro del sistema.	Presiones más bajas facilitan la aparición y colapso violento de burbujas, generando mayor impacto sobre los microorganismos presentes.
Tiempo de tratamiento	Duración en la que el agua permanece en el reactor en condiciones de cavitación.	Un tiempo adecuado permite una buena desinfección; excesos pueden provocar la formación de subproductos no deseados si la concentración es muy baja.
Energía del sistema	Cantidad de energía requerida para mantener la cavitación activa.	Aumentar la energía del reactor puede acelerar la destrucción microbiana y mejorar el rendimiento del tratamiento.
Nivel de desinfección	Porcentaje de reducción microbiana alcanzado.	Incrementa la exposición de los contaminantes a condiciones extremas, mejora la uniformidad del tratamiento y reduce el consumo energético global.
Índice de cavitación	Relación entre presión dinámica y presión de vapor del fluido.	Define la tendencia del sistema a generar cavitación; niveles elevados requieren control para evitar efectos adversos o ineficiencia.

2.4.3 Cavitación hidrodinámica rotativa como método de desinfección de aguas residuales de la industria cafetera

La eficiencia de la cavitación rotativa radica en su capacidad para inducir daño estructural a las membranas celulares de los microorganismos, principalmente mediante mecanismos mecánicos y oxidativos. El colapso de microburbujas en condiciones rotacionales genera gradientes de presión y cizallamiento que afectan directamente la viabilidad bacteriana, mientras que los radicales hidroxilos generados en el proceso contribuyen a la ruptura del ADN y oxidación de proteínas intracelulares (Shah et al., 2020; Sun et al., 2020).

Estudios recientes han demostrado que los reactores de cavitación rotacional logran niveles de desinfección comparables o superiores a métodos convencionales, como la cloración o la radiación UV, pero sin los efectos secundarios asociados al uso de compuestos químicos residuales

ni la formación de subproductos tóxicos (Zheng et al., 2022). Además, se ha reportado que esta tecnología puede cumplir con normativas internacionales de calidad microbiológica del agua (por ejemplo, reducción de al menos 3 log de *E. Coli*), lo cual la hace compatible con criterios de reúso agroindustrial o descarga controlada en cuerpos hídricos (OMS, 2017; Decreto 0631 de 2015).

Particularmente en la industria cafetera, donde los sistemas de tratamiento a menudo se enfrentan a desafíos de escalabilidad, costos operativos y eficiencia en la eliminación bacteriana, la cavitación hidrodinámica rotativa representa una alternativa modular, adaptable y de bajo consumo energético, capaz de integrarse a procesos existentes sin requerimientos tecnológicos complejos (Gostiša et al., 2021).

2.5 Reúso de aguas residuales

El reúso de aguas residuales tratadas representa una estrategia clave para mejorar la sostenibilidad hídrica en sectores como el cafetero, especialmente en regiones agrícolas donde el acceso al recurso hídrico puede ser limitado. Desde una perspectiva conceptual, el reúso implica aprovechar nuevamente las aguas residuales después de aplicar un tratamiento adecuado que garantice su calidad según el tipo de aplicación y los parámetros exigidos por la normativa (ver sección 2.3). Aunque *Escherichia coli* es un indicador ampliamente utilizado en estudios microbiológicos, la normativa colombiana establece sus valores de referencia en términos de coliformes fecales, los cuales incluyen este tipo de bacterias. En la tabla 2 se presentan los valores máximos permitidos de coliformes fecales, establecidos según el tipo de uso propuesto. Asimismo, en el (Apéndice F) se describen los criterios físicos y microbiológicos que definen la calidad del agua destinada a uso agroindustrial.

Tabla 3.*Tipos de reúso y límites permitidos por la norma 1256 de 2021.*

Tipo de reúso	Límite de Coliformes Fecales (NMP/100mL)
Riego de cultivos para consumo humano crudo	≤ 200
Riego de cultivos industriales o pasturas	≤ 10.000
Usos industriales sin contacto directo	≤ 1.000
Recarga de acuíferos	≤ 10

Aunque existan regulaciones claras sobre esta práctica, su aplicación real en regiones cafeteras enfrenta desafíos significativos, como infraestructura insuficiente, altos costos operativos y falta de acceso a tecnologías asequibles por parte de pequeños productores. Estos límites son el punto de referencia para verificar si un proceso de tratamiento, como el desarrollado en este estudio mediante cavitación hidrodinámica rotativa, es lo suficientemente eficiente para permitir el reúso del agua tratada.

3. Estado del arte

La problemática del tratamiento de aguas residuales en la industria cafetera es un tema ampliamente estudiado en Colombia y otros países, debido a su alto impacto ambiental. A lo largo de los años, se han explorado diversas tecnologías para reducir la carga orgánica, presencia de patógenos y contaminantes químicos, con miras al reúso del efluente. En relación con lo anterior, la cavitación hidrodinámica constituye una alternativa prometedora dentro del tratamiento terciario (Cenicafé, 2020).

En el ámbito internacional, la cavitación hidrodinámica se reconoce como un proceso fisicoquímico capaz de generar microburbujas de vapor que, al colapsar, liberan energía suficiente para eliminar en las aguas residuales los compuestos orgánicos y microorganismos que resulten patógenos. Un estudio de Gogate y Pandit (2011) resaltan el potencial de las tecnologías de cavitación acústica e hidrodinámica para descomponer contaminantes complejos y mejorar la desinfección en tratamientos terciarios (Gogate & Pandit, 2011). Este tipo de tratamiento es especialmente efectivo en la degradación de compuestos persistentes y en la inactivación de bacterias, lo que ha generado interés en su aplicación en diversas industrias, incluida la cafetera.

En términos de la reutilización de aguas tratadas, según la investigación realizada por Zhang et al. (2020) en China revela que la cavitación hidrodinámica complementa varias tecnologías para mejorar la calidad del agua, como la filtración por membranas y los procesos de oxidación. Esto permite su reutilización en agricultura e industria. (Zuluaga-Vasco & Zambrano-Franco, s.f.). Estos estudios concluyen que la cavitación es eficiente al combinarse con otros procesos, en tema de costos los reduce significativamente y aumenta la viabilidad operativa para su implementación a gran escala (Zhang, Liu, & Yang, 2020).

En Colombia, en los últimos 20 años la investigación se ha enfocado principalmente en la reducción de contaminantes y la búsqueda de soluciones sostenibles para mitigar el impacto ambiental (Orozco, D. et al., 2022). El Centro Nacional de Investigaciones de Café (Cenicafé) destaca la relevancia en implementar tecnologías innovadoras que mejoren la calidad del agua tratada, y permitan su reúso agrícola, como el riego de cultivos (Cenicafé, 2020).

El estudio de Jaramillo et al. (2021) evaluaron la cavitación hidrodinámica en plantas de tratamiento de aguas residuales de pequeñas fincas cafeteras y hallaron que, junto con filtración y sedimentación, reduce en gran medida la concentración de materia orgánica y microorganismos (Jaramillo, García, & Montoya, 2021). También, mejora los procesos de cloración y la ozonización tradicionales, convirtiéndose en una solución para las regiones rurales con infraestructura limitada (Jaramillo, García, & Montoya, 2021).

Así mismo, las investigaciones de la Universidad Nacional de Colombia sobre tecnologías de cavitación han propuesto que la cavitación hidrodinámica puede ser integrada con métodos de oxidación avanzada para lograr mayor eficiencia en la desinfección y económica de aguas residuales provenientes de la industria cafetera. (Acosta González, 2024).

El presente estudio evalúa la cavitación hidrodinámica en el tratamiento terciario de aguas residuales de la industria cafetera, identificando las variables operativas clave de la tecnología ARHCR (Advanced Rotary Hydrodynamic Cavitation Reactor) y su impacto en la desinfección del agua (Valencia, P. et al., 2021). A través de un diseño experimental, se espera optimizar su aplicación en el sector cafetero colombiano, y generar alternativas para el reúso de aguas tratadas en actividades agroindustriales. Este trabajo avanza en la resolución de la problemática al proporcionar una solución sostenible y económicamente viable para el tratamiento de aguas residuales, con un enfoque en el reúso seguro en aplicaciones agrícolas (Valencia, P. et al., 2021).

4. Metodología

Este proyecto se desarrolló hacia el logro de los objetivos establecidos enfocado en el cumplimiento de estos, en la figura 2 se ilustra el proceso metodológico general seguido.

Figura 1.

Esquema metodológico general del proyecto



4.1 Revisión bibliográfica sobre la tecnología ARHCR en general y su implementación en el tratamiento de aguas residuales en la industria cafetera

4.1.1 Exploración de la literatura sobre cavitación en términos generales

Se efectuó una revisión de artículos científicos, informes técnicos, libros y sitios web relacionados con el fenómeno de la cavitación. Este proceso permitió profundizar el entendimiento de su mecanismo, identificar variables operativas clave y explorar sus aplicaciones en el tratamiento de aguas residuales.

4.1.2 Revisión bibliográfica acerca de la cavitación aplicada al tratamiento de aguas residuales en la industria cafetera

Se llevó a cabo una búsqueda bibliográfica sobre la técnica de cavitación hidrodinámica aplicada en el tratamiento de aguas residuales, enfocándose en su capacidad para desinfectar las aguas mieles. Además, se identificaron los principales parámetros de calidad del agua discutidos en la literatura, así como los estándares normativos en Colombia, que regulan su vertimiento y su posible reúso en actividades agrícolas.

4.2 Determinación de variables operativas involucradas en el proceso y elección de la variable de respuesta

Con base en la revisión bibliográfica realizada y el análisis del sistema, se identificaron diversas variables operativas relevantes para la eficiencia del tratamiento (ver Tabla 5). Entre ellas, el número de pasadas del fluido a través del reactor (ciclos), se determinó como la variable más influyente. En la siguiente sección se sustenta esta elección, partiendo de la hipótesis de que una mayor exposición del agua a las condiciones cavitacionales incrementa la probabilidad de daño celular en los microorganismos, favoreciendo así su inactivación.

En función de lo anterior, se definió como variable dependiente la reducción bacteriana, medida a partir de la concentración de unidades formadoras de colonia (UFC/mL) luego del tratamiento. Esta elección permite disponer de un parámetro cuantificable para evaluar la efectividad del sistema en la desinfección del agua residual generada en el beneficio del café.

4.2.1 Caracterización de la muestra de agua residual

Se realizó la toma de muestra en tres momentos clave: la primera, corresponde a la muestra inicial con más de 24h de fermentación antes de iniciar el proceso de cavitación, una vez el agua había pasado por los tratamientos primario y secundario; la segunda en un tiempo medio establecido cuando la muestra ya circulaba en el reactor, y la tercera, al finalizar la etapa de desinfección, tras haber cumplido el número de pasadas definido. La caracterización inicial incluyó un análisis fisicoquímico con rangos de pH entre (5,5-5,8), temperatura entre (23,1-24,1) °C, así como un análisis microbiológico para detectar la presencia de coliformes y otros patógenos. Estos datos permitieron establecer una línea base para evaluar la eficiencia del tratamiento.

4.3 Introducción al sistema y realización de pruebas experimentales exploratorias

4.3.1 Montaje del sistema

Inicialmente la empresa contaba con un prototipo para el montaje del sistema. Se dispusieron los materiales necesarios y se empezó con la limpieza y ensamblaje de las tuberías por donde iba a circular la muestra de agua, el sistema fue unificado con un recipiente y dos bombas para formar un sistema de circulación cerrado, sobre puesto en una base de madera para evitar movimientos causados por la vibración producida durante la operación. Luego, se conectaron las tuberías al reactor de cavitación, asegurando su integración con el motor, las bombas y el tanque. Finalmente, se efectuaron pruebas exploratorias para detectar posibles fugas y verificar la funcionalidad antes de su puesta en marcha.

Figura 2.

Esquema del sistema ensamblado de cavitación hidrodinámica rotativa



Nota: El sistema experimental está conformado por:(1) Recipiente de almacenamiento, (2) manómetro de presión, (3) válvulas de paso, (4) ARHCR, (5) Motor eléctrico de 1 Hp, (6) Bomba.

Puesto en marcha, se midió el caudal del ARHCR, obteniéndose un valor de 1,73 L/s con un volumen de agua de 26 L. Este caudal se incorporó en la ecuación (1) para determinar el número de pasadas (n_p), parámetro que estima las veces que el fluido atraviesa el sistema de cavitación.

$$n_p = \frac{Q * t}{v} \quad (\text{Ec 1})$$

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

4.3.2 Etapas exploratorias

En la fase inicial de esta investigación, se realizaron ensayos exploratorios para identificar las condiciones operativas más adecuadas para el funcionamiento del reactor de cavitación hidrodinámica rotacional avanzada (ARHCR).

Se efectuaron ensayos independientes con números de pasadas de 240 (1h), 480 (2h) y 720 (3h), lo que permitió obtener una visión preliminar de la eficiencia del proceso en distintos tiempos de tratamiento. Esto permitió optimizar el uso de materiales, tiempo y energía, lo que a su vez mostró un comportamiento clave sobre el sistema en diferentes etapas operativas.

A partir de los resultados, se estructuró un diseño experimental para evaluar el impacto del tiempo de operación y del número de pasadas sobre la eficiencia del reactor en la remoción microbiológica del agua residual.

4.3.3 Análisis microbiológico

Para evaluar el efecto de desinfección sobre la *Escherichia coli*, se recolectaron muestras antes, en un tiempo intermedio y después del tratamiento de cavitación. El objetivo fue comparar la presencia de microorganismos en los tres momentos, considerando como variable respuesta la concentración bacteriana de *E. coli*.

En la realización del análisis microbiológico se incluyeron las etapas de preparación de diluciones seriadas y siembra mediante vertimiento en placa (método de profundidad), siguiendo el procedimiento descrito en los (Apéndice R) y (Apéndice S). En términos generales, este proceso consistió en la preparación de la solución diluyente y del medio de cultivo, la esterilización del material, así como la codificación y organización de las diluciones en tubos de ensayo.

4.4 Planteamiento del diseño experimental

El planteamiento de este diseño buscó evaluar la capacidad de desinfección del reactor de cavitación para reducir la carga microbiana. Se definió como variable de respuesta la concentración

de microorganismos (UFC $\times 10^7$ /mL), siendo el número de pasadas el factor principal de estudio. Con base en los resultados de las pruebas exploratoria, se establecieron tres niveles de tratamiento: 0 (0s), 360 (5.400 s) y 600 (9.000 s). Adicionalmente, se consideraron como covariables la temperatura del agua y el pH, ya que podrían tener influencia en los resultados. Cada tratamiento contó con ocho réplicas, completando un total de 24 corridas experimentales. La unidad experimental correspondió a una muestra de 50 mL de agua en circulación a través del reactor de cavitación tomada en cada nivel de tratamiento.

Este enfoque permitió reducir el error experimental al controlar las variaciones entre bloques, garantizando que todos los niveles del tratamiento fueran evaluados en condiciones comparables (Montgomery, 2005; American Public Health Association, 2017).

4.5.1 Pruebas experimentales

Con base en el diseño experimental establecido, se desarrollaron las pruebas orientadas a determinar la eficiencia del reactor de cavitación hidrodinámica rotacional en la reducción de *Escherichia coli* en aguas residuales del proceso de beneficio del café. Los muestreos se realizaron en tres puntos específicos del tratamiento (0, 360 y 600 pasadas) por el reactor, para observar la progresión de la desinfección en función del tiempo de exposición al proceso cavitacional.

Además de la cuantificación microbiológica, se incorporó la medición de variables operativas clave que permitieron caracterizar de forma integral el entorno físico del sistema y su posible influencia sobre la eficiencia del tratamiento. Entre estas variables se encuentran:

pH del sistema acuoso: Registrado antes y después de cada conjunto de pasadas mediante un medidor multiparamétrico HI 2550 de la marca HANNA®. Esta medición fue fundamental para

identificar posibles variaciones en la acidez o alcalinidad que pudieran influir tanto en la viabilidad microbiana como en la estabilidad del proceso de cavitación.

Corriente eléctrica absorbida por el motor: Evaluada con una pinza amperimétrica UNI-TREND UT200A, esta variable permitió monitorear el comportamiento energético del sistema durante el tratamiento. El seguimiento del consumo eléctrico aportó información relevante sobre la estabilidad operativa del reactor y su rendimiento a medida que se incrementaba el número de pasadas.

Temperatura del agua tratada: Considerando que la cavitación genera zonas locales de alta energía que pueden reflejarse en un aumento de la temperatura, se realizaron mediciones con un termómetro digital en cada punto de muestreo. El control térmico fue esencial para descartar efectos secundarios sobre la actividad microbiana o sobre la eficiencia del proceso.

La integración de estas variables permitió una comprensión más completa del comportamiento del reactor bajo distintas condiciones de operación, y facilitó la identificación de relaciones entre el entorno físico-químico del sistema y la efectividad en la remoción bacteriana observada. Para determinar la eficacia del tratamiento se realizaron análisis microbiológicos en cada una de las muestras recolectadas. Las pruebas involucraron la dilución seriada de cada muestra y el cultivo en medios selectivos (*Chromocult*) para el conteo de unidades formadoras de colonias (UFC) (Tal como en la sección 4.3.3). Este proceso permitió cuantificar la concentración de *E. coli* antes y después del tratamiento, facilitando la evaluación de la reducción bacteriana. La concentración de UFC/mL se determinó contando las colonias en la placa, considerando el factor de dilución correspondiente y usando la siguiente ecuación (Brown, 2004):

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

5. Resultados y análisis

Las pruebas experimentales se llevaron a cabo con éxito, siguiendo los protocolos descritos en la anterior sección. El estudio se centró en evaluar la reducción de *E. coli* en agua residual del café a diferente número de pasadas y en registrar variables operativas como pH, corriente eléctrica y temperatura del agua. Estos datos se encuentran recopilados de forma completa en el (Apéndice G) y sirvieron de base para el análisis y las conclusiones presentadas en este trabajo.

5.1 Resultados pruebas experimentales preliminares

Como fase inicial, se realizaron pruebas exploratorias para evaluar el comportamiento del equipo y su efecto sobre la reducción microbiana, empleando números de pasadas de 0, 240 (1 hora), 480 (2 horas) y 720 (3 horas).

En la primera prueba, correspondiente a 240 pasadas, no se registró una reducción significativa en la concentración de *E. coli* respecto a la muestra inicial. En cambio, a 480 pasadas se evidenció una disminución notable en la carga bacteriana y un aumento en la temperatura. Finalmente, con 720 pasadas, se alcanzó la eliminación total de *E. coli*, obteniéndose una temperatura final del sistema de 59.3 °C y sin detección de unidades formadoras de colonia.

La Tabla 3 muestra los resultados preliminares de la reducción logarítmica bacteriana en función del número de pasadas, calculada mediante la Ecuación 3 (Bolton et al., 2001).

$$\text{Reducción log} = \log_{10}(C_0) - \log_{10} C \quad \text{Ec (3)}$$

Tabla 4.

Resultados de la reducción logarítmica (pruebas preliminares)

Número de pasadas	Reducción logarítmica
240	1
480	3
720	7

Con relación en estos resultados preliminares, se definieron los números de pasadas de 0, 360 y 600 para la experimentación definitiva.

5.2 Resultados pruebas experimentales siguiendo el diseño experimental

Los resultados obtenidos fueron organizados en tablas donde se observa la evolución de la carga bacteriana a lo largo del tratamiento. La tabla 4 presenta la concentración de *E. coli* (UFC/ml) en función del número de pasadas a través del cavitador. Asimismo, la tabla 5 expone la reducción logarítmica calculada de acuerdo con la Ec.3 detallando los resultados obtenidos en cada ensayo individual con sus respectivas réplicas.

Tabla 5.

Resultados de la concentración microbiana post tratamiento con cavitación en función del número de pasadas

Concentración [UFC/mL]								
Np	EXPI		EXP2		EXP3		EXP 4	
	PROM	DESVIACIÓN ESTÁNDAR	PROM	DESVIACIÓN ESTÁNDAR	PROM	DESVIACIÓN ESTÁNDAR	PROM	DESVIACIÓN ESTÁNDAR
0	4.70E+07	4.24E+06	2.60E+08	1.41E+07	3.30E+07	4.10E+07	5.55E+08	3.46E+08
360	2.00E+05	4.24E+04	7.25E+05	8.13E+05	1.46E+05	1.75E+05	1.80E+05	4.24E+04
600	0.00E+00	0.00E+00	6.00E+00	5.66E+00	1.00E+00	1.41E+00	0.00E+00	0.00E+00

Tabla 6.

Reducción logarítmica de la carga microbiana según el número de pasadas por el cavitador siguiendo el diseño experimental

Número de pasadas	Reducción logarítmica							
	EXP 1		EXP 2		EXP 3		EXP 4	
	PROM	DESVIACIÓN ESTANDAR	PROM	DESVIACIÓN ESTANDAR	PROM	DESVIACIÓN ESTANDAR	PROM	DESVIACIÓN ESTANDAR
0	0	0	0	0	0	0	0	0
360	2	0	2.5	-0.707106	2	0	2.5	-0.707106
600	7.5	0.707106	4.5	0.707106	6	0	8	0

En términos generales, se observa una disminución progresiva de la carga microbiana a medida que aumenta el número de pasadas. La concentración inicial alcanzó valores de hasta $8,0 \times 10^8$ UFC/mL, lo que refleja la elevada carga contaminante de las aguas residuales en el lavado de café. Con 360 pasadas, la concentración redujo hasta $2,7 \times 10^5$ UFC/mL. Finalmente, con 600 pasadas, se logró la eliminación total de *E. coli* en tres de los cuatro ensayos, y una concentración mínima de 10 UFC/mL en el restante.

Estos resultados superan la reducción mínima de 3 log exigido por la OMS (2017) para garantizar seguridad microbiológica en agua y cumplen con el límite establecido en el Decreto 631 de 2015 (≤ 10 UFC/mL), lo que permite considerar el reúso agroindustrial o el vertimiento seguro en suelo o alcantarillado.

5.3 Análisis estadístico

El análisis estadístico se realizó utilizando RStudio enfocado en modelar la relación entre la variable de respuesta (concentración microbiana de *E. coli*) y el número de pasadas de fluido por el sistema ARHCR, así como en evaluar la posible influencia de covariables operativas (T, pH y corriente eléctrica).

5.3.1 Comportamiento de la concentración en función del número de pasadas

Para el análisis estadístico se hizo por el método ANCOVA de covarianza, donde se definió estadísticamente el comportamiento de la concentración en función del número de pasadas.

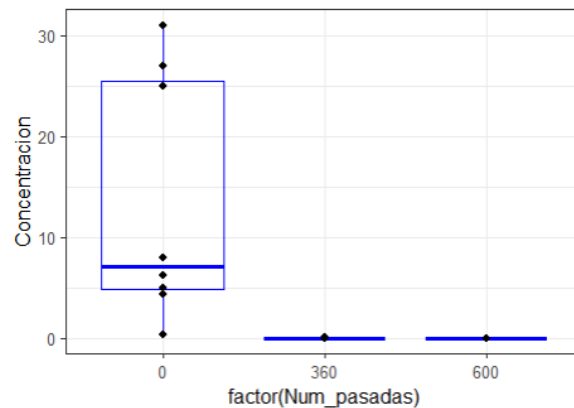
Tabla 7.

Resultados del análisis exploratorio de los datos

Número de pasadas	Min	Q1	Q2	Media	Q3	Max
0	0.4	4.85	7.1	13.4	25.5	31
360	0.0022	0.015	0.019	0.0313	0.024	0.13
600	0	0	0	0.0000004	0.0000004	0.000002

Figura 3.

Concentración en función del número de pasadas



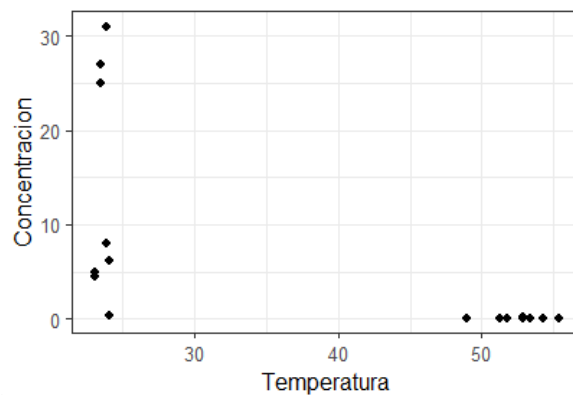
Antes de iniciar el proceso de cavitación la concentración varió entre los 0.4 y 31 UFCx107/ml en donde el 75% de las muestras estuvieron por debajo de 25.5 UFCx107/ml. Tras 360 pasadas la concentración disminuyó a un rango de 0.0022 a 0.13UFCx10/mL, con el 75% por debajo de 0.024. Finalmente, después de las 600 pasadas se registraron valores nulos hasta un máximo de 0.000002 UFC/ml. La reducción microbiana fue del 99.77% entre las pasadas 0 y 360, y del 99.9983% entre las pasadas 360 y 600.

5.3.2 Comportamiento de la concentración microbiana en función de las variables operativas

Se consideran variables operativas (o “ruido”) aquellas que no fueron manipuladas directamente, si no que se generan como consecuencia indirecta del proceso de cavitación y que pueden influir en la variable respuesta. Por ello, se realizó un análisis individual de la concentración microbiana en función de la temperatura, corriente eléctrica y el pH.

Figura 4.

Comportamiento de la concentración microbiana en función de la temperatura

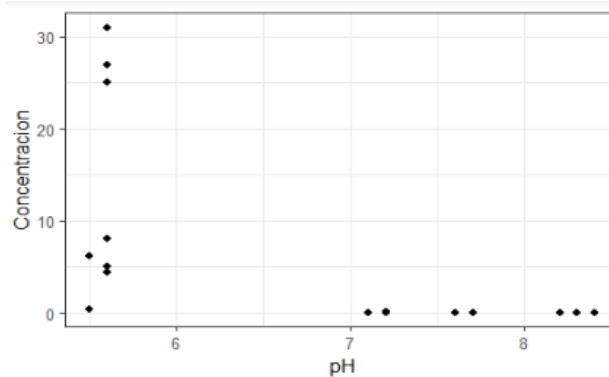


Durante las pruebas, la temperatura aumentó progresivamente desde 22 °C hasta el rango de 55–60 °C, en función del número de pasadas. En la figura 4, se registraron temperaturas por debajo de 25°C correspondientes a las muestras iniciales, con concentraciones de *E. coli* elevadas (varias por encima los 25 UFCx×10⁷/ml, aunque también con valores menores a 10 UFCx×10⁷/ml). En cambio, tras 360 y 600 pasadas, se registraron temperaturas superiores a 45°C y concentraciones muy bajas (menores a 0.05UFCX ×10⁷/ml). Este incremento de temperatura se atribuye tanto al calentamiento adicional producido por el funcionamiento de la bomba centrífuga como a la energía liberada durante el proceso de cavitación, donde el colapso de microburbujas

genera calor como, lo que fomenta la efectividad del proceso oxidativo y acelerando la descomposición de contaminantes orgánicos y microorganismos.

Figura 5.

Comportamiento de la concentración microbiana en función de pH

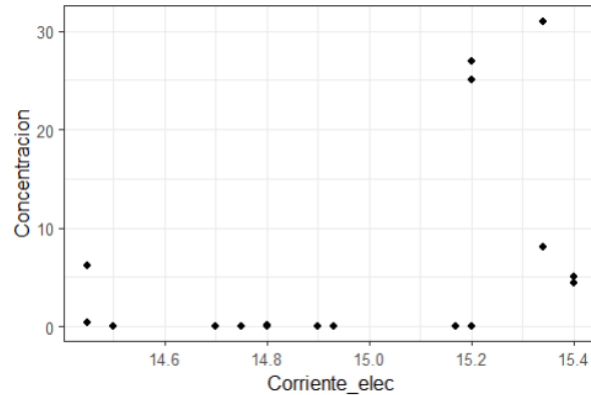


En la Figura 5 se observa los puntos de dispersión que corresponden a los tres tiempos del tratamiento: etapas iniciales (pH más ácido), intermedias y finales (pH más alcalino). En la fase inicial (0 pasadas) el pH es bajo (< 6), valor característico del agua residual sin tratamiento y se asocia con concentraciones más altas de *E. coli*. A medida que avanza el tratamiento se produce un incremento progresivo del pH, alcanzando valores superiores a 7, en los cuales la mayoría de las muestras presentan concentraciones menores a $0,05 \times 10^7$ UFC/mL.

Este comportamiento se explica por la degradación progresiva de ácidos orgánicos presentes en la muestra durante el proceso de cavitación, lo que provoca un incremento significativo del pH. Además, la generación de radicales hidroxilos ($\bullet\text{OH}$) durante el colapso de las burbujas induce reacciones de oxidación que modifican el equilibrio ácido-base, generando condiciones más alcalinas.

Figura 6.

Comportamiento de la concentración microbiana en función de la corriente eléctrica



Se evidencia que para corrientes entre los 14.5 y los 15.17 [A], los valores de concentración estuvieron muy cercanos a cero y la corriente se mantuvo en el rango; sin embargo, tuvo una ligera reducción en la demanda energética del tratamiento. Este comportamiento puede explicarse a partir del principio de Bernoulli, el cual explica que, a medida que un fluido incrementa su velocidad al pasar por zonas estrechas del reactor, su presión disminuye. Considerando además el efecto de la temperatura, un aumento de esta reduce la viscosidad del agua y facilita el flujo. La disminución de presión, junto con una menor viscosidad, favorece el paso del líquido con menor resistencia, generando un régimen de operación más eficiente, en el que la circulación requiere menos energía y se optimiza el desempeño del sistema. (Cadence System Analysis, s. f.; Zheng et al., 2022).

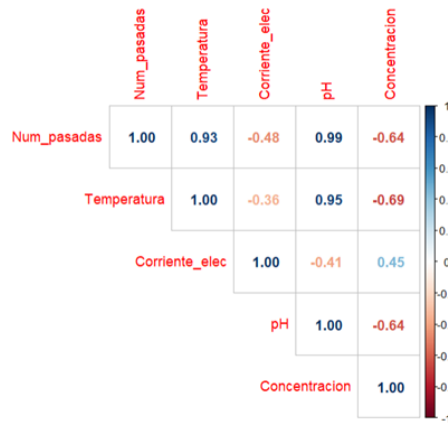
5.3.3 Análisis de correlación entre variables

Para terminar de entender cómo se relacionan las variables del sistema, se realizó un análisis de correlación (figura 7). Se evidenció una fuerte correlación negativa entre el número de pasadas y la concentración microbiana ($r=-0.64$), confirmando que el tratamiento reduce efectivamente la carga microbiana. Al contrario, la T y el pH se incrementan, mientras que la corriente eléctrica disminuye ligeramente. Esto evidencia un problema de multicolinealidad, ya

que las tres covariables dependen directamente del número de pasadas, actuando como efectos no controlados del factor principal más que como variables independientes.

Figura 7.

Análisis de correlación de las variables principales con las variables ruido



5.3.4 Modelamiento

Se aplicó un modelo lineal de efectos fijos, inicialmente se incluyeron todas las variables ruido, con el objetivo de descartar posibles relaciones ocultas. La hipótesis principal del modelo fue:

$$H_0: \tau_i = 0 \forall i = 1,2,3 \tag{Ec (4)}$$

$$H_1: \text{por lo menos un } \tau_i \neq 0 \tag{Ec (5)}$$

Donde:

τ_i : efecto del tratamiento i

Para validar las hipótesis se usa un análisis de covarianza ANCOVA. La salida de R se presenta en la Tabla 7.

Tabla 8.

Resultados modelamiento

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
Pasadas	2	951.86	475.93	9.35	0.001642	**
Temperatura	1	0	0	0	0.99742	
Corriente eléctrica	1	112.63	112.63	2.2128	0.154181	
pH	1	1.99	1.99	0.0391	0.845467	
Residuals	18	916.22	50.9			

Signific. Codes: 0 “***” 0.001 “**” 0.1 “*” 0.05 “.” 0.1 “ ” 1

A un nivel significancia del 1%, se rechaza la hipótesis nula para el factor pasadas ya que su valor-p es menor a 0.01, esto indica que el número de pasadas tiene un efecto significativo sobre la concentración microbiana. En cambio, las covariables no resultaron significativas y fueron descartadas del modelo.

Tabla 9.

Resultados modelamiento coeficientes de regresión

Coefficients:					
	Estimate	Error	t	Pr(> t)	
	Std.		value		
(Intercept)	13.375	2.477	5.399	2.4E-05	***
Pasadas 360	-13.344	3.503	-3.809	0.00102	**
Pasadas 600	-13.375	3.503	-3.818	0.001	**

Signific. Codes: 0 “****” 0.001 “**” 0.1 “*” 0.05 “.” 0.1 “ ” 1

Con base en los resultados del modelamiento los coeficientes de regresión (ver Tabla 8), se obtuvo el siguiente modelo:

- Modelo: $c = 13,375 - 13,344 * pasadas_{360} - 13,375 * pasadas_{600}$

Este modelo indica que, en promedio, la concentración microbiana inicial sin tratamiento fue de 13.375 UFCx107/ml, mientras que con 360 y 600 pasadas se logró una reducción de 13.344 y 13.375 unidades. La similitud de estos coeficientes muestra que el efecto desinfectante del

sistema se estabiliza a partir de 360 pasadas, y que extender el tiempo de tratamiento hasta 600 pasadas no aporta una mejora adicional estadísticamente significativa.

El coeficiente de determinación del modelo fue del 48,01 %, lo que explica menos de la mitad de la variabilidad total observada. Este nivel de ajuste es limitado y sugiere que existen otros factores adicionales no considerados que pueden influir en los resultados, como variaciones en la temperatura del agua, ligeras fluctuaciones en la presión interna del sistema y diferencias en la calidad inicial del efluente. Aun así, un R^2 de este nivel no invalida la utilidad del modelo, ya que en procesos con alta variabilidad biológica y física es común que la respuesta no dependa exclusivamente de la variable principal (número de pasadas), sino también de interacciones complejas con otros parámetros operativos y ambientales (Montgomery, 2017; Zhang et al., 2020).

En este sentido, se aplicaron pruebas adicionales de Shapiro-Wilk y Breusch-Pagan, las cuales evidenciaron que no se cumplían los supuestos de normalidad ni de homogeneidad de varianzas. Ante esta situación, se optó por un contraste no paramétrico que confirmó la existencia de diferencias significativas entre tratamientos y, por ende, la eficacia del proceso, incluso cuando tales requisitos estadísticos no se satisfacen.

```
Mood's median test
data: Datos_model$Concentracion by Datos_model$Pasadas
p-value = 0.0001553
```

Con un nivel de significancia del 1 %, la conclusión se mantuvo coherente con los resultados obtenidos mediante el ANCOVA.

5.5 Resultados y análisis del parámetro EEO

El parámetro EEO (Electric Energy per Order of Reduction) permite evaluar la eficiencia energética del proceso de desinfección mediante cavitación hidrodinámica, expresando la cantidad

de energía eléctrica (kWh/m³) requerida para lograr una reducción logarítmica de bacterias. Según Bolton et al. (2001), su cálculo se realiza mediante la siguiente expresión:

$$EEO = \frac{P}{Q \cdot \text{Log}_{10}(CFU)} \quad \text{Ec(6)}$$

Donde:

P es la potencia total del sistema en kW.

Q es el caudal en m³/h.

log₁₀(CFU) es la reducción logarítmica de la concentración microbiana (*E. coli*).

Tabla 10.

Parámetro EEO

600 pasadas						
	Log ₁₀ [UFC]	Corriente eléctrica	Q[L/s]	P[KW]	EEO[kWh/m]	
EXP 1	7,67	14,70	1,7308	3,056	0,2302	
EXP 2	4,49	14,50	1,7308	3,015	0,2227	
EXP 3	6,16	14,93	1,7308	3,104	0,1623	
EXP 4	8,20	14,75	1,7308	3,067	0,1220	

Los resultados obtenidos para 600 pasadas mostraron valores de EEO que oscilaron entre (0,1220 y 0,2302 kWh/m³), indicando un comportamiento eficiente en términos energéticos. Se evidenció una relación inversa entre el EEO y la reducción logarítmica de la carga microbiana: a mayor log₁₀(UFC), menor fue el valor del EEO, lo cual sugiere que el sistema requiere menos energía por unidad de log de reducción cuando el tratamiento es más efectivo. Este comportamiento se observó particularmente en el experimento 4, donde se alcanzó la mayor reducción logarítmica (8,20) con el menor valor de EEO (0,1220 kWh/m³). También se evidencia estabilidad operativa del sistema, ya que los valores de corriente eléctrica, potencia y caudal se mantuvieron constantes entre experimentos. En el (Apéndice C) se encuentra una matriz comparativa de distintas tecnologías de tratamiento terciario. Los resultados obtenidos se

encuentran dentro del rango de EEO correspondiente a la cavitación, siendo una alternativa favorable comparada con otras tecnologías de desempeño similar, como la radiación UV y la filtración por membranas.

5.6 Análisis del potencial de reúso

Este análisis presenta una evaluación preliminar del potencial de reúso del agua residual del beneficio húmedo del café, tratada mediante el sistema ARHCR, en posibles aplicaciones agroindustriales. Para ello, se contrastaron los parámetros obtenidos con los límites establecidos en la Resolución 1207 de 2014 y 1256 de 2021 (ver Tabla 2 y 10). Tras 600 pasadas, el pH aumentó de 5.5 hasta 8.4, superando el rango normativo (6,0-9,0) desde las 360 pasadas, lo que, junto al efecto mecánico de la cavitación, crea un ambiente poco propicio para la supervivencia de patógenos.

Por otro lado, la *E. coli* redujo 2 logaritmos con 360 pasadas (aún por encima del límite de 5000 NMP/100 MI), lo que indica una mejora parcial pero aún insuficiente frente al límite normativo. Sin embargo, al llegar a las 600 pasadas la reducción alcanzó los 7 log (0 -20 UFC/ml), garantizando un nivel muy por debajo del máximo permitido.

Tabla 11.

Límites máximos permisibles para reúso agrícola

Variable	Unidad de Medida	Valor Límite
FÍSICOS		
pH	Unidades de Ph	4.5-9,0
Conductividad	μS/cm	1.500,0
MICROBIOLÓGICOS		
Coliformes Termotolerantes	NMP/100 mL	5000
Enterococos Fecales	NMP/100 mL	1000

Adaptado de Resolución 1256 de 2021 del MADS

No obstante, debe aclararse que la Resolución 1256 de 2021 exige la evaluación de otros parámetros de carácter fisicoquímicos y microbiológicos que no fueron medidos en estudio debido a limitaciones de laboratorio. En consecuencia, los resultados obtenidos del efluente permiten hablar de un alto potencial de reúso condicionado en escenarios como riego agrícola y áreas verdes (coliformes termo tolerantes (≤ 5000 NMP/100 ml), procesos industriales sin contacto con alimentos (≤ 1000 NMP/ 100 ml) y limpieza de equipos en beneficio húmedo. Para aplicaciones de mayor exigencia como el riego de cultivos de consumo crudo (≤ 200 NMP/100 ml) o la recarga de acuíferos (≤ 10 NMP/100 ml y ausencia de protozoos/helminetos) bastaría integrar un pulido final y validar patógenos emergentes.

Así, el tratamiento demostró un comportamiento progresivo y eficaz tras 600 ciclos, evidenciando avances hacia el cumplimiento de algunos criterios normativos básicos establecidos para el reúso agroindustrial del agua. Los resultados sugieren un potencial de aplicación en riego agrícola y áreas verdes, en procesos industriales sin contacto con alimentos y en el lavado de superficies o equipos en entornos agroindustriales, constituyéndose en una alternativa viable y sostenible para la industria cafetera.

6. Conclusiones

La tecnología (ARHCR) demostró ser efectiva como tratamiento terciario de las aguas residuales del beneficio húmedo del café, logrando una reducción promedio de 7 log de *E. Coli* tras 600 pasadas. Este resultado refleja una alta eficiencia, alineada con criterios sanitarios de la OMS y valores de referencia del Decreto 631/2015. No obstante, entre 0 y 360 pasadas la desinfección avanzó lentamente, sugiriendo la necesidad de profundizar en el estudio cinético del proceso de cavitación.

Asimismo, el número de pasadas fue la variable operativa más influyente, aunque el modelo estadístico explicó solo el 48% de la variabilidad. Esto indica la necesidad de considerar en futuros estudios variables adicionales como la demanda química de oxígeno (DQO), sólidos suspendidos totales (SST), potencial redox (ORP) y composición fenólica, factores que podrían modular directamente la efectividad del proceso.

En este sentido, aunque el diseño experimental factorial confirmó estadísticamente la importancia del número de pasadas, también evidenció multicolinealidad entre temperatura, pH y corriente eléctrica. Este hallazgo sugiere que futuras investigaciones deberían emplear modelos estadísticos más avanzados, como modelos no lineales o mixtos, que permitan una comprensión más precisa y una optimización efectiva del proceso.

Finalmente, el efluente tratado con ARHCR cumplió en los parámetros evaluados (pH y reducción bacteriana de *Escherichia coli*) según la Resolución 1256/2021, lo que evidencia su potencial para aplicación como riego de cultivos no comestibles y limpieza de equipos. Sin embargo, para garantizar un reúso seguro y sostenible, es necesario complementar la evaluación con parámetros adicionales como conductividad eléctrica, enterococos fecales, SST, DBO/DQO,

turbidez y nutrientes, acompañados de pretratamientos adecuados y un programa de monitoreo que proteja el suelo, los cultivos y la salud pública en el contexto agroindustrial cafetero.

7. Recomendaciones

Para fortalecer la aplicabilidad del sistema, se recomienda continuar con la evaluación de otros parámetros fisicoquímicos (conductividad) y microbiológicos exigidos por la normativa, como coliformes fecales, la presencia de *Salmonella spp.*, huevos de helmintos y protozoos, con el fin de ampliar el espectro de posibles usos del agua tratada.

Asimismo, se sugiere, como mejora operativa, incluir controles de temperatura, dado que esta variable mostró un incremento progresivo durante el proceso. Considerando que *E. coli* puede ser inactivada térmicamente a altas temperaturas, resulta fundamental regular este parámetro, ya que permitirá diferenciar si la reducción bacteriana se debe a los efectos propios del tratamiento o a condiciones térmicas favorables para la muerte de la bacteria.

Para prevenir taponamientos y se prolongue la vida útil y la eficiencia operativa del reactor ARHCR, se recomienda instalar un filtrado previo escalonado, debido a que el cavitador tiene poros muy pequeños.

En complemento, se plantea ejecutar estudios de escalamiento semiindustrial en condiciones reales, en al menos dos fincas con composiciones de aguas residuales diferentes, comparando los resultados obtenidos en laboratorio con los datos de campo, con el fin de optimizar los parámetros de diseño y modelado del sistema.

Para tener una visión más amplia del proyecto se sugiere un análisis costo-beneficio que cuantifique la inversión de capital y los costos operativos (energía, mantenimiento) frente al ahorro en consumo de agua y disposición de efluentes, comparando escenarios de pequeña y mediana escala para facilitar su adopción como alternativa eficiente en la agroindustria cafetera.

Referencias Bibliográficas

Aqua Quimica (s.f.) *Ventajas y desventajas del tratamiento del agua con ozono*

<https://aquaquimica.net/ventajas-desventajas-agua-ozono/#:~:text=Desventajas%20del%20tratamiento%20con%20ozono&text=Los%20aparatos%20usados%20para%20la,la%20exposici%C3%B3n%20de%20los%20trabajadores.>

Acosta González, R.D. (2024). *Informe de investigación sobre tecnologías de cavitación aplicadas al tratamiento de aguas residuales*. (Trabajo de grado de maestría, Universidad Nacional de Colombia). Repositorio Institucional Universidad Nacional de Colombia.

<https://repositorio.unal.edu.co/items/f754811b-0fa8-485c-ba69-dbe08f47c80f>

Arndt, R. E. A. (2002). Cavitation in fluid machinery and hydraulic structures. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 34, 143–175.

Bandala, E. R., & Rodríguez-Narváez, O. M. (2019). On the nature of hydrodynamic cavitation process and its application for the removal of water pollutants. *Environmental Chemistry Letters*, 17(3), 1179–1189

Bernal Marín, C. C.; Chisco, W. A., & Velásquez Zambrano, Y. P. (2023) *Implementación de filtros biotecnológicos conformado por Sistemas Modulares (SMTA) y Filtros Verdes Con Pasto Vetiver (Chrysopon zizanooides), para descontaminar las aguas residuales provenientes del beneficio del café En Las Fincas, La Polka, Santa Rita Y Zelandia Del Municipio De El Libano Tolima*. [Trabajo de Grado] Universidad Nacional Abierta y a Distancia UNAD

<https://repository.unad.edu.co/bitstream/handle/10596/59988/ccbernalma.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

- Bolton, J. R., Bircher, K. G., Tumas, W., & Tolman, C. A. (2001). Figures-of-merit for the technical development and application of advanced oxidation technologies for both electric- and solar- driven systems (IUPAC Technical Report). *Pure and Applied Chemistry*, 73(4), 627–637. <https://doi.org/10.1351/pac200173040627>
- Brennen, C. E. (2013). *Cavitation and bubble dynamics*. Cambridge University Press.
- Cadence System Analysis. (s. f.). *Hydrodynamic Cavitation: Mechanisms and Applications*. <https://resources.system-analysis.cadence.com/blog/msa2023-hydrodynamic-cavitation-mechanisms-and-applications>
- Cenicafé. (2020). *Informe técnico sobre la calidad de aguas en la industria cafetera colombiana*.
- Environmental Protection Agency (1999) *Folleto informativo de tecnología de aguas residuales Desinfección con luz ultravioleta* <https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-06/documents/cs-99-064.pdf>
- EPA. (1999). Folleto informativo de tecnología de aguas residuales. Desinfección con ozono. Epa.gov. <https://19january2017snapshot.epa.gov/sites/production/files/2015-06/documents/cs-99-063.pdf>
- Federación Nacional de Cafeteros de Colombia. (1999). *Tratamiento de aguas residuales del lavado del café*. <https://www.cenicafe.org/es/publications/bot020.pdf>
- Federación Nacional de Cafeteros de Colombia. (2006). *Tratamiento anaerobio de las aguas mieles del café*. <https://www.cenicafe.org/es/publications/bot029.pdf>
- Franc, J.-P., & Michel, J.-M. (2006). *Fundamentals of cavitation*. Springer.
- Gogate, P. R., & Pandit, A. B. (2011). A review of imperative technologies for wastewater treatment I: Oxidation technologies at ambient conditions. *Advances. Environmental Research*, 8(3), 501-551.

- Gostiša, T., Petkovšek, A., Kosel, J. (2021). Influence of hole geometry on performance of a rotational hydrodynamic cavitation reactor. *Frontiers in Energy Research*, 10, Article 881811
- Gostiša, T., Bizjan, B., Širok, B., Zupanc, M., & Dular, M. (2021). *Investigation into cavitation intensity and COD reduction performance of the pinned disc reactor with various rotor–stator arrangements*. *Ultrasonics Sonochemistry*, 77, Article 105669.
<https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2021.105669>
- Granados Alba, M. I. & Lemus Moreno, L. D. (2024) *Estudio de la viabilidad técnica de la cavitación en el tratamiento de aguas residuales para la empresa AC Ingeniería Virtual* [Trabajo de grado] Universidad Industrial de Santander
<https://noesis.uis.edu.co/server/api/core/bitstreams/bed496a6-49a9-4b8d-bbd2-671e6f045864/contente>
- IWA Publishing. (2022). Hydrodynamic cavitation as an efficient water treatment method for pollution control. *Water Science & Technology*, 86(2), 302–312.
<https://doi.org/10.2166/wst.2022.270>
- Jaramillo, J. L., García, H., & Montoya, L. (2021). Evaluación de la cavitación hidrodinámica en el tratamiento de aguas residuales en pequeñas fincas cafeteras. *Revista Colombiana de Tecnologías Sostenibles*, 8(2), 91-101.
- Litter, M. I. (2022). Últimos avances en tecnologías de base fotoquímica aplicadas a eliminación de contaminantes en agua. Litter, Marta Irene; Últimos avances en tecnologías de base fotoquímica aplicadas a eliminación de contaminantes en agua; Asociación Química Argentina; *Industria y Química*, 371, 1. <https://ri.conicet.gov.ar/handle/11336/204636>

- López Ibarra, J. (2023). *Tratamiento de aguas residuales: procesos y aplicaciones* [Trabajo de grado, Universidad Autónoma de Colombia]. Repositorio Institucional Universidad Autónoma de Colombia. <https://repositorio.uniautonoma.edu.co/handle/123456789/786>
- Nuevo, D. (2022) *Filtros verdes para aguas residuales*. <https://www.tecpa.es/filtro-verde-depuracion-aguas-residuales/>
- Organización Mundial de la Salud (OMS). (2017). *Guías para la calidad del agua potable: criterios de salud y otras bases para establecer normas nacionales*. Cuarta edición incorporando la primera adenda. Ginebra: OMS.
<https://www.who.int/publications/i/item/9789241549950>
- Orozco, D. et al. (2022). Innovaciones tecnológicas en el tratamiento de aguas residuales de la industria cafetera. *Revista Ambiental de Colombia*, 12(1), 45-53.
- Ozono Carbars (s.f.) *Ozono en el Tratamiento de Aguas Residuales*
<https://www.ozonocarbars.com/generadores-de-ozono/usos-y-aplicaciones-del-ozono/tratamiento-de-aguas-residuales-con-ozono/>
- Quintero García, K. L.; Rodríguez Zúñiga, D. P.; González Duque, M. E. & Arroyave Rojas. J. A. (2021) Evaluación de la remoción de nitrógeno y materia orgánica a través de humedales artificiales de flujo subsuperficial, acoplados a reactores de lecho fijo con microalgas en la Institución Universitaria Colegio Mayor de Antioquia. *Ingeniería y Región* 25
https://portal.amelica.org/ameli/jatsRepo/238/2382079006/html/?utm_source=chatgpt.com
- Resolución 1207 (2014) *Por la cual se adoptan disposiciones relacionadas con el uso de aguas residuales tratadas*. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible

<https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/10/7.-Anexo-7-Resolucion-1207-de-2014.pdf>

Resolución 631 (2015) *Por el cual se establece el límite máximo permisible de contaminantes en vertimientos puntuales a cuerpos de agua superficiales y al sistema de alcantarillado público*. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.

<https://www.minambiente.gov.co/documento-normativa/resolucion-631-de-2015/>

Rodríguez Valencia, N. (2009). Estudio de un biosistema integrado para el postratamiento de las aguas residuales del café utilizando macrófitas acuáticas [Tesis doctoral]. Universitat Politècnica de Valencia. <https://riunet.upv.es/entities/publication/71dd6542-5311-4097-af08-d3770a7d5c84>

Rodríguez Valencia, N. (2023) *Filtros verdes para el manejo, tratamiento y cero descargas de las aguas residuales del beneficio del café*

<https://publicaciones.cenicafe.org/index.php/memorias/article/view/564/709>

Rodríguez Valencia, N. (2023) *Sistemas de tratamiento natural, com énfasis en cero descargas, para el postratamiento y manejo de aguas agroindustriales*

<https://www.cenipalma.org/wp-content/uploads/2023/10/1.-Sistemas-de-tratamiento-natural-para-el-postratamiento-de-los-efluentes-generados-en-diferentes-agroindustrias-Nelson-Rodriguez-Cenicafe.pdf>

Rodríguez Valencia, N.; Castañeda, S. A.; Quintero Yepes, L. V.; (s.f.) Filtros verdes para el manejo y tratamiento de las aguas residuales del café con cero descargas. *Disciplina Poscosecha*

https://publicaciones.cenicafe.org/index.php/avances_tecnicos/article/view/298/366

- Rodríguez Valencia, N.; Castañeda, S. A.; Quintero Yepes, L. V.; (2022) *Tecnología de filtros verdes para el manejo, tratamiento y cero descarga de las aguas residuales de la finca cafetera* https://www.cenicafe.org/es/publications/Libro_FV_2022_Ok.pdf
- Telwesa (2025) *Procesos de membrana en tratamiento de aguas residuales* <https://telwesa.com/procesos-de-membrana-en-aguas-residuales/>
- Ultra Aqua (s.f.) *Tecnología de Ozono* <https://ultraaqua.com/es/tecnologia-de-ozono/>
- Unidad de Planificación Rural Agropecuaria - UPRA. (s.f.). *UPRA adelanta la evaluación financiera del cultivo de café en Colombia.* e <https://upra.gov.co/es-co/saladeprensa/Paginas/UPRA-adelanta-la-evaluaci%C3%B3n-financiera-del-cultivo-de-caf%C3%A9-en-Colombia.aspx>
- Usma Higueta, J. A. & Zapata Agudelo, D. (2023) *Ozonización como tratamiento para la integración de aguas residuales domésticas en sectores agrícolas* [Monografía] Universidad de Antioquia [https://bibliotecadigital.udea.edu.co/server/api/core/bitstreams/98fc8d24-c645-4b26-95c7de109e0b4572/content#:~:text=Los%20tratamientos%20con%20ozono%20para,et%20al.%2C%202011\).](https://bibliotecadigital.udea.edu.co/server/api/core/bitstreams/98fc8d24-c645-4b26-95c7de109e0b4572/content#:~:text=Los%20tratamientos%20con%20ozono%20para,et%20al.%2C%202011).)
- Valencia, P. et al. (2021). Nuevas tecnologías para el tratamiento de aguas residuales en Colombia. *Revista Colombiana de Ingeniería Ambiental*, 9(2), 25-34.
- Wikipedia. (s. f.). *Cavitation*. <https://en.wikipedia.org/wiki/Cavitation>
- Young, F. R. (1989). *Cavitation*. McGraw-Hill.
- Zhang, Z., Liu, H., & Yang, Y. (2020). Application of cavitation technology for wastewater treatment in China: A comprehensive review. *Journal of Cleaner Production*, 243, 118606.

Zheng, H., Zheng, Y., & Zhu, J. (2022). Recent developments in hydrodynamic cavitation reactors: Cavitation mechanism, reactor design, and applications. *Engineering*, 19(12), 180–198. <https://doi.org/10.1016/j.eng.2022.08.003>

Zheng, H., Zheng, Y., & Zhu, J. (2022). Recent developments in hydrodynamic cavitation reactors: Cavitation mechanism, reactor design, and applications. *Engineering*, 19(12), 180–198. <https://doi.org/10.1016/j.eng.2022.04.027>

Zuluaga-Vasco, J., & Zambrano-Franco, D. (s.f.). *Manejo del agua en el proceso de beneficio h/medo del caf... para el control de la contaminaci"n*.
<https://doi.org/10.38141/10779/0187>

Apéndices

Apéndice A. Caracterización fisicoquímica de las aguas residuales.

Resultados de pruebas fisicoquímicas de aguas residuales del café

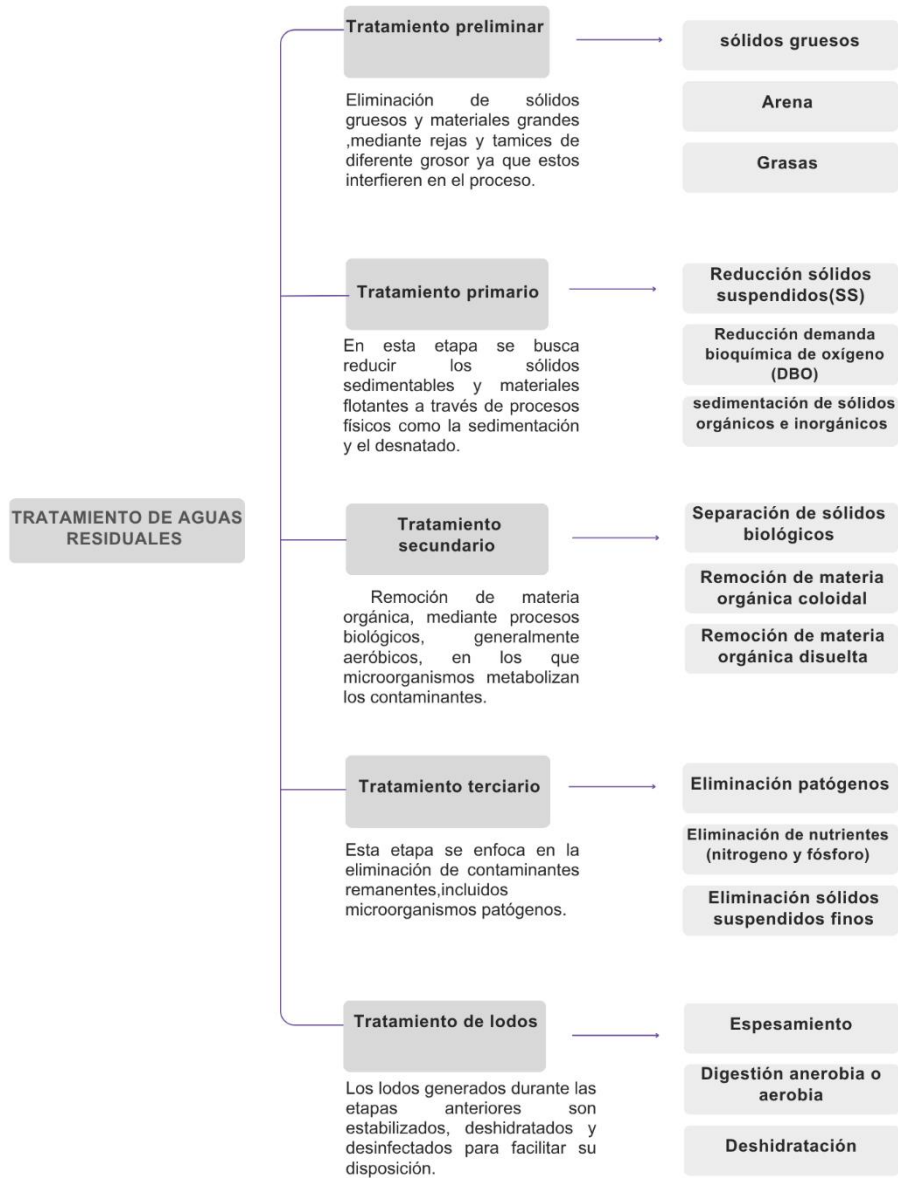
Característica	Fermentación 24 horas	Impacto ambiental
pH	4,025 ± 0,035	Acidificación del agua, daños a la vida acuática.
Conductividad (µS/cm)	3,035 ± 0,035	Alta concentración de sales y minerales disueltos puede afectar la vida acuática y la irrigación de cultivos.
Oxígeno disuelto (mg/L)	1,25 ± 0,070	Requiere alta demanda de oxígeno llegando a causar muerte de peces u otros organismos.
Cromo (mg/L)	< 0,02	Tóxicos para los ecosistemas acuáticos.
Amonio (mg/L)	<0,1	
Nitrógeno total (mg/L)	135	Puede causar eutrofización (crecimiento excesivo de algas).
DQO (mg/L)	> 1500	Alta concentración de materia orgánica en el agua.
Sólidos volátiles (g/L)	26,41 ± 0,028	Alta concentraciones de sólidos al sedimentarse pueden crear una capa en la superficie de ríos reduciendo la penetración de luz solar afectando la fotosíntesis en plantas acuáticas.
Sólidos minerales (g/L)	3,29 ± 0,070	
Sólidos totales (g/L)	29,705 ± 0,091	
Acidez volátil (mg ácido acético/L)	90	Alta acidez afecta el pH del agua y el suelo, causando daños en los ecosistemas acuáticos y terrestres.
Cloruros (mg/L)	20 ± 1,2	Tóxicos para algunas especies y corrosión de tuberías.
Fósforo soluble (mg/L)	15,157 ± 0,88	Crecimiento excesivo de algas.
Color (ΔE)	8,11	Reduce la penetración de la luz solar en el agua y fotosíntesis de plantas acuáticas.

Nota. Adaptado de Torres-Valenzuela (2019), *Caracterización fisicoquímica y microbiológica de aguas mieles del beneficio del café*, *Revista Ingenierías*, 18 (2), 47–60.

<https://revistas.uis.edu.co/index.php/revistaion/article/view/10619/10461>

Apéndice B. Tratamientos de aguas residuales y sus principales objetivos.

Niveles de tratamiento para aguas residuales



Nota: Adaptado de *Tratamiento de aguas residuales: procesos y aplicaciones* (López Ibarra, 2023).

Apéndice C. Tecnologías tratamiento terciario*Principales tecnologías como tratamiento terciario*

Principales tecnologías usadas como tratamiento terciario	
Tecnología	En que consiste
Filtración	Retiene materia en suspensión al pasar por el agua por un medio poroso.
Flotación con aire disuelto	Consiste en generar burbujas que arrastran partículas a la superficie para su eliminación.
Membranas de filtración	Consiste en retener contaminante mediante membranas, según el tamaño de poro o carga eléctrica.
Ultrafiltración	Retiene moléculas de tamaño entre 0.001 y 0.1 μm .
Ósmosis inversa	Consiste en aplicar presión para mover agua de una disolución concentrada a una diluida, eliminando las sales disueltas.
Electrodialisis	Consiste en transportar iones a través de membranas usando energía eléctrica, permitiendo el paso de contraiones y bloqueando coiones según su carga.
Microfiltración	Utiliza membranas con poros de 0.1 a 10 μm para eliminar partículas mayores a 0.1 μm del agua.

Nota. Adaptado de SETAPH (2023). *Tratamientos terciarios para reutilización de agua.*

<https://www.setapht.com/blog/tratamientos-terciarios-para-reutilizacion-de-agua/>

Matriz comparativa de los principales tratamientos terciarios usados en la industria cafetera

TECNOLOGÍA TRATAMIENTO TERCIARIO												
TECNOLOGIA	FUNCIONAMIENTO	VENTAJAS	DESVENTAJAS	COSTO (INVERSION)	EFEECTO BUSCADO	TIEMPO DE PROCESO	EFICACIA	IMPACTO AMBIENTALSI	EEO	PORCENTAJE DE DESINFECCIÓN	APLICABLE AGUAS RESIDUALES DEL	REFERENCIAS
CAVITACIÓN	Generación y colapso de microburbujas desintegrando contaminantes.	Proceso limpio que no requiere añadir químicos.	Requiere costo de inversión inicial, requiere consumo energético	Alto, dependiendo la escala.	Destrucción de microorganismos patógenos.	Moderado. En horas.	Alta	Positivo: No genera subproductos.	0.04 - 9.33 kWh/m ³	99 - 99.9%	Si, prometedora	(Darandale et al., 2023)
FILTROS VERDES	Tratamiento natural aplicando de forma controlada el agua residual a un cultivo forestal.	Su construcción y operación es fácil. Mantenimiento sencillo.	Requieren grandes áreas de terreno, mator riesgo de contaminación de las aguas subterráneas, no es aplicable en todos los suelos.	Depende el tamaño del cultivo. \$ 100.000/m2	Tratamiento natural de aguas residuales que reduce significativamente la carga contaminante.	Moderado. De horas a días	Alta DBO(85-98%), N(40%) , P (50 -90%) , DQO (88.89-98%), ST	Positivo: favorece el hábitat natural, reduce huella de carbono, integra el ecosistema local	No aplica	88-99%	Si , muy adecuada	Nuevo, D (2022)
RADIACIÓN UV	electromagnética al material genético del microorganismo.	El método es seguro, rápido y eficaz y no genera contaminación	La irradiación es un tratamiento de alto costo.	Alto, dependiendo la escala.	Reducción de microorganismos patógenos.	Rápido, en minutos	Alta	No genera subproductos peligrosos.	0.6 - 0.21 kWh/m ³	99 - 99.99%	Parcialmente	EPA (1999)
FILTRACION POR MEMBRANAS	Barreras físicas semipermeables restringiendo el paso de moléculas	Muy útil como método cotratamiento	Obstrucción y ensuciamiento de la membrana, así como la presión requerida Altos costos de implementación	Depende la escala	Reducción de SS, microorganismos y turbiedad.	Moderado, depende de la presión y el flujo	Alta	Si, puede generar metales pesados	0- 1 kWh/m ³	98 - 99%	Parcialmente	Telwesa (2025)
OZONO	Consiste en producir gas ozono, que es un fuerte oxidante, y mezclarlo con el agua para purificarla.	El ozono es 3600 veces más eficiente que el cloro por su capacidad desinfectante y el tiempo que tarda en inactivar los microorganismos.	Se deben tomar medidas especiales para trabajar con el ozono y evitar la exposición de los trabajadores pueden afectar a ojos y pulmones.	Depende de la cantidad de ozono requerido y la capacidad de la planta.	Reducción de microorganismos patógenos.	10 a 30 minutos)	Alta	no genera residuos peligrosos	1- 20 kWh/m ³	89% en patógenos	Si, pero costoso	Aqua Química (s.f)
SMTA	Digestión anaerobia proceso biológico en el que microorganismos descomponen la materia orgánica en ausencia de oxígeno.	Método más popular y de los más usados. Bajo consumo energético.	Requiere de bastante tiempo. Requiere tratamiento posterior para cumplir con las normativas ambientales.	Varía según la escala del cultivo.	Reducción contaminante orgánicos.	4 a 9 días	80% DQO, 83.4 % DBO, 45.99 % ST Y 74.3 % SST	Genera biogás metano (65-75%)	No aplica	Mayores al 80%	Si, de los más usados	Federacion Nacional de Cafeteros de Colombia (2006)

Apéndice D. Microorganismos infecciosos presentes en las aguas residuales del café

Tabla 4. Microorganismos en aguas contaminadas por subproductos de café

Microorganismo	Recuento (UFC/ml)
Aerobios mesófilos	5,2 x 10 ⁷
Coliformes totales	1,99x 10 ⁵
Coliformes fecales	1,2x 10 ³
Enterococos	8,5 x 10 ²
Mohos y Levaduras	3,1x 10 ⁶
Salmonella-Shiguella	<10

Nota. Adaptado de Mejía Zuluaga, S. Z. (2018), *Manejo de aguas residuales provenientes del beneficio húmedo del café en la zona cafetera central de Colombia* [Monografía de pregrado, Universidad Nacional Abierta y a Distancia – UNAD], p. 40. Repositorio Institucional UNAD. <https://repository.unad.edu.co/bitstream/handle/10596/21180/42683065.pdf?sequence=1>

Apéndice E. Parámetros fisicoquímicos para vertimientos y reúso de agua residual del café.

Parámetros fisicoquímicos para vertimientos y reúso del beneficio de café

Parámetro	Unidades	Beneficio de café (clasificación de la federación nacional de cafeteros-FNC/ Cenicafé) proceso tradicional
Generales		
Ph	Unidades de Ph	5,00 a 9,00
Demanda Química de oxígeno (DQO)	mg/L O ₂	650,00
Demanda Bioquímica de oxígeno (DBO ₅)	mg/L O ₂	400,00
Sólidos Suspendidos Totales (SST)	mg/L	400,00
Sólidos sedimentables (SSED)	mg/L	10,00
Grasas y aceites	mg/L	10,00
Compuestos de Fósforo		
Fosforo Total (P)	mg/L	Análisis y Reporte
Compuestos de Nitrógeno		
Nitrógeno Total (N)	mg/L	Análisis y Reporte
Otros Parámetros para Análisis y Reporte		
Color Real(Medidas de absorbancia a las siguientes longitudes de onda: 436nm, 525 nm y 620 nm).	m ⁻¹	Análisis y Reporte

Nota. Adaptado de *Resolución 631 de 2015, por la cual se establecen los parámetros y valores límites máximos permisibles en vertimientos puntuales a cuerpos de agua superficiales y a los sistemas de alcantarillado público* (Colombia, Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2015).

<https://www.minambiente.gov.co/documento-normativa/resolucion-631-de-2015/>

Apéndice F. Criterios de calidad**Parámetros de calidad del agua agroindustrial**

Variable	Unidad de Medida	Valor Límite Máximo Permisible
FÍSICOS		
	Unidades de	
pH	Ph	6,0-9,0
Conductividad	uS/cm	1.500,0
MICROBIOLÓGICOS		
Coliformes Termotolerantes	NMP/100 mL	1,0*E(+5)
Enterococos Fecales	NMP/100 mL	1,0*E(2)
Helminthos Parásitos	Huevos y	
Humanos	Larvas/L	1,0
Protozoos Parásitos		
Humanos	Quistes/L	1,0
<i>Salmonella sp</i>	NMP/100 mL	1,0

Nota. Adaptado de Resolución 1207 (2014) Por la cual se adoptan disposiciones relacionadas con el uso de aguas residuales tratadas. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible

<https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/10/7.-Anexo-7-Resolucion-1207-de-2014.pdf>

Apéndice G. Recopilación de datos

Recopilación de datos obtenidos y hallados en el estudio

Código Muestra	Fecha	Volumen Sistema (V)	Volumen Muestra (Vm)	Tiempo proceso (t)	Número pasadas (np)	Temperatura (Tc)	Corriente Eléctrica (I)	pH	Título de la dilución	LR	UFC	Concentración	REDUCCION LOG10
-		[L]	[L]	[s]	-	[°C]	[A]	-				[UFC/mL]	inicial - LOG10 final)
PR-10-R1	3 Abril 2025	26	0,05	0	0	23,9	15,47	5,8	1,00E+06	0	40	4,00E+07	
PR-10-R2	3 Abril 2025	25,95	0,05	0	0	23,9	15,47	5,8	1,00E+06	0	37	3,70E+07	1,23
PR-11-R1	3 Abril 2025	25,9	0,05	3600	240,583496	38,1	15,1	7,8	1,00E+04	2	20	2,00E+05	2,30
PR-11-R2	3 Abril 2025	25,85	0,05	3600	241,0488412	38,1	15,1	7,8	1,00E+05	1	22	2,20E+06	
PR-10-R1	07 Abril 2025	26	0,05	0	0	24,1	15,35	5,7	1,00E+06	0	32	3,20E+07	
PR-10-R2	07 Abril 2025	25,95	0,05	0	0	24,1	15,35	5,7	1,00E+05	0	35	3,50E+06	2,31
PR-12-R1	7 Abril 2025	25,9	0,05	7200	481,1669919	45,1	14,9	7,8	1,00E+03	3	15	1,50E+04	3,33
PR-12-R2	7 Abril 2025	25,85	0,05	7200	482,0976824	45,1	14,9	7,8	1,00E+03	3	17	1,70E+04	
PR-10-R1	21 Abril 2025	26	0,05	0	0	23,1	15,19	5,5	1,00E+06	0	29	2,90E+07	
PR-10-R2	21 Abril 2025	25,95	0,05	0	0	23,1	15,19	5,5	1,00E+06	0	25	2,50E+07	7,40
PR-13-R1	21 Abril 2025	25,9	0,05	10800	721,7504879	59,3	14,8	8,4	0,00E+00	6	0	0,00E+00	7,46
PR-13-R2	21 Abril 2025	25,85	0,05	10800	723,1465237	59,3	14,8	8,4	0,00E+00	6	0	0,00E+00	
E1-Np0-R1	23 Abril 2025	26	0,05	0	0	23,1	15,4	5,6	1,00E+06	0	50	5,00E+07	
E1-Np0-R2	23 Abril 2025	25,95	0,05	0	0	23,1	15,4	5,6	1,00E+06	0	44	4,40E+07	
E1-Np360-R1	23 Abril 2025	25,9	0,05	5400	360,875244	49	14,9	7,1	1,00E+04	2	17	1,70E+05	2,47
E1-Np360-R2	23 Abril 2025	25,85	0,05	5400	361,5732618	49	14,9	7,1	1,00E+04	2	23	2,30E+05	2,28
E1-Np600-R1	23 Abril 2025	25,8	0,05	9000	603,7899754	51,3	14,7	8,3	0,00E+00	6	0	0,00E+00	7,70
E1-Np600-R2	23 Abril 2025	25,75	0,05	9000	604,9623831	51,3	14,7	8,3	0,00E+00	6	0	0,00E+00	7,64
E2-Np0-R1	28 Abril 2025	26	0,05	0	0	23,5	15,2	5,6	1,00E+07	0	25	2,50E+08	
E2-Np0-R2	28 Abril 2025	25,95	0,05	0	0	23,5	15,2	5,6	1,00E+07	0	27	2,70E+08	
E2-Np360-R1	28 Abril 2025	25,9	0,05	5400	360,875244	52,9	14,8	7,2	1,00E+05	2	13	1,30E+06	2,28
E2-Np360-R2	28 Abril 2025	25,85	0,05	5400	361,5732618	52,9	14,8	7,2	1,00E+04	3	15	1,50E+05	3,26
E2-Np600-R1	28 Abril 2025	25,8	0,05	9000	603,7899754	53,4	14,5	8,4	1,00E+01	6	2	2,00E+01	4,81
E2-Np600-R2	28 Abril 2025	25,75	0,05	9000	604,9623831	53,4	14,5	8,4	1,00E+01	6	1	1,00E+01	4,18
E3-Np0-R1	30 Abril 2025	26	0,05	0	0	24,1	14,45	5,5	1,00E+06	0	62	6,20E+07	
E3-Np0-R2	30 Abril 2025	25,95	0,05	0	0	24,1	14,45	5,5	1,00E+05	1	40	4,00E+06	
E3-Np360-R1	30 Abril 2025	25,9	0,05	5400	360,875244	51,8	15,17	7,6	1,00E+04	2	27	2,70E+05	2,36
E3-Np360-R2	30 Abril 2025	25,85	0,05	5400	361,5732618	51,8	15,17	7,6	1,00E+03	3	22	2,20E+04	2,26
E3-Np600-R1	30 Abril 2025	25,8	0,05	9000	603,7899754	53,4	14,93	8,2	1,00E+00	0	2	2,00E+00	5,79
E3-Np600-R2	30 Abril 2025	25,75	0,05	9000	604,9623831	53,4	14,93	8,2	0,00E+00	0	0	0,00E+00	6,60
E4-Np0-R1	12 Mayo 2025	26	0,05	0	0	23,9	15,34	5,6	1,00E+06	1	80	8,00E+07	
E4-Np0-R2	12 Mayo 2025	25,95	0,05	0	0	23,9	15,34	5,6	1,00E+07	0	31	3,10E+08	
E4-Np360-R1	12 Mayo 2025	25,9	0,05	5400	360,875244	54,3	15,2	7,7	1,00E+04	3	21	2,10E+05	2,58
E4-Np360-R2	12 Mayo 2025	25,85	0,05	5400	361,5732618	54,3	15,2	7,7	1,00E+04	3	15	1,50E+05	3,32
E4-Np600-R1	12 Mayo 2025	25,8	0,05	9000	603,7899754	55,4	14,75	8,2	0,00E+00	7	0	0,00E+00	7,90
E4-Np600-R2	12 Mayo 2025	25,75	0,05	9000	604,9623831	55,4	14,75	8,2	0,00E+00	7	0	0,00E+00	8,49

Apéndice H. Toma de muestra y Pretratamiento del agua residual.

Agua miel



Pre-tratamiento

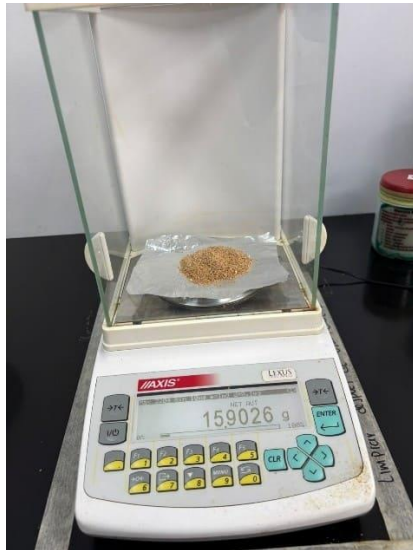


Filtrado

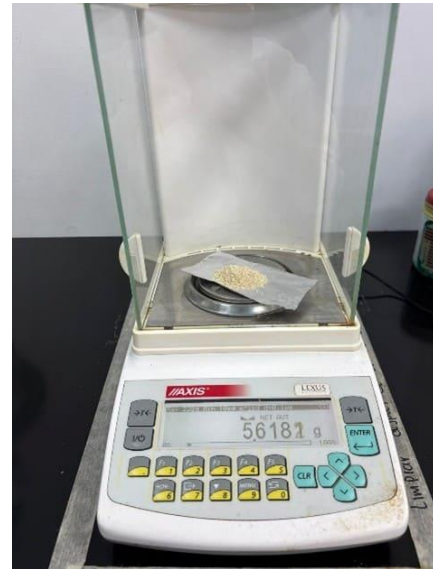


Apéndice I. Preparación y medición del medio de cultivo y Agua peptonada

Agar Chromocult



Peptonada Tamponada



sln preparada



Apéndice J. Esterilización y autoclave

Material para esterilizar



Autoclave



Material estéril



Apéndice K. Puesta en marcha de prueba experimental

Sistema en circulación

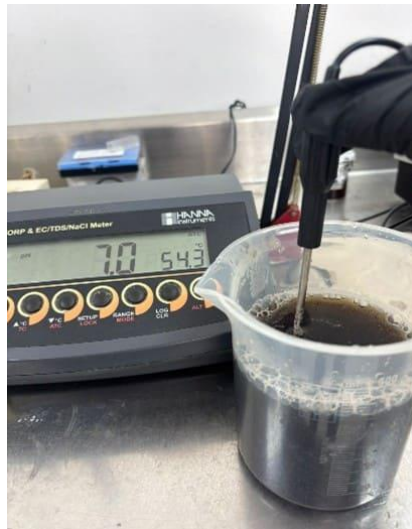


Apéndice L. Control y toma de datos en las variables trabajadas

Medición de pH



Medición Temperatura



Apéndice M. Adecuación del espacio de trabajo

Campana de extracción

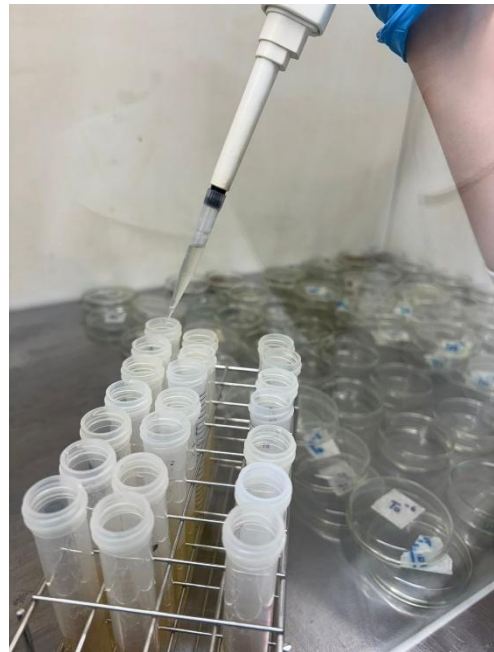


Apéndice N. Preparación de diluciones y siembra

Preparación tubos de ensayo



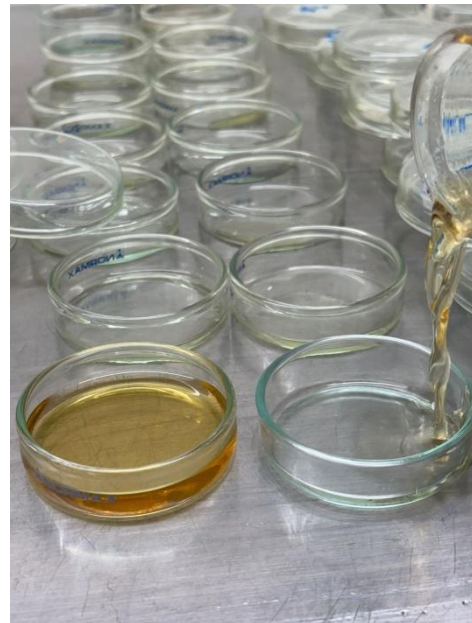
Diluciones seriadas



Siembra profundidad



Medio de cultivo servido



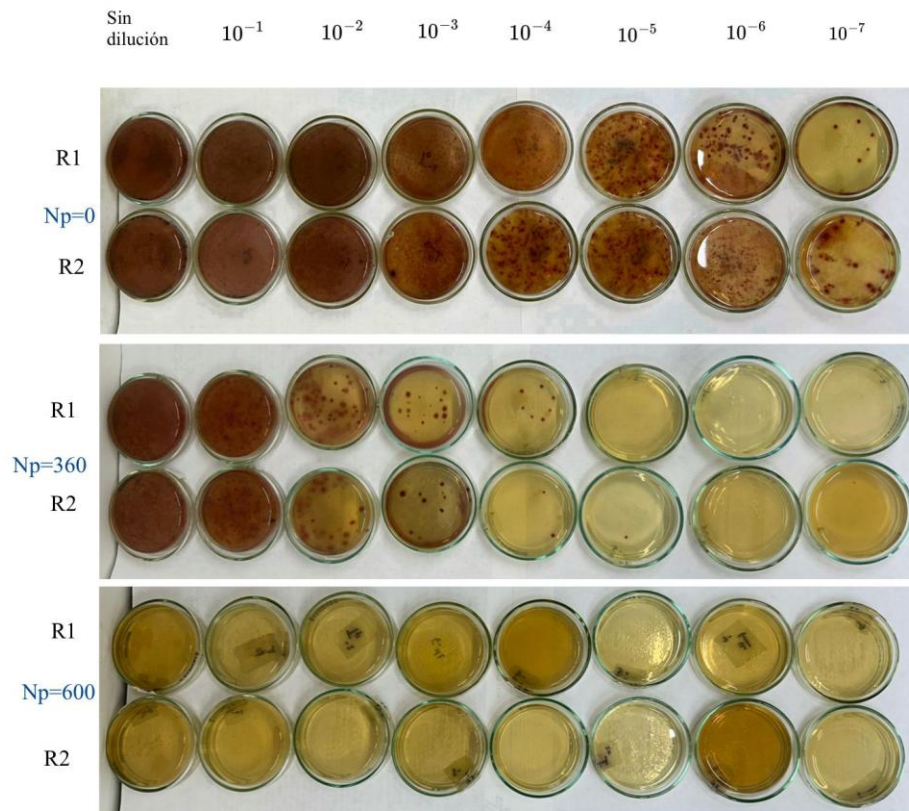
Apéndice O. Incubación de muestras

Cajas petri en Incubadora a 35°C.



Apéndice P. Resultados medio de cultivo

Resultados experimento 4



Apéndice Q. Análisis estadístico haciendo uso del programa

```

# Librerías----
library(readxl)
library(tidyverse)
library(corrplot)
library(car)
library(RVAideMemoire)
library(lmtest)

# Importar datos----
options(scipen = 99)

Datos <- read_excel("Datos.xlsx")

Datos_2 <- Datos %>% mutate(
  across(c(Experimento, Replica), as.factor),
  Concentracion2 = (Concentracion*1000*Vol_sistema)/1000000000, # Unidades x 10^9
  Concentracion = Concentracion/10000000, # Unidades x 10^7
  Num_pasadas = case_when(
    Tiempo_proceso == 0 ~ 0,
    Tiempo_proceso == 5400 ~ 360,
    Tiempo_proceso == 9000 ~ 600,
  )
)

# 1. Análisis exploratorio----

# 1.1. Univariado

summary(Datos_2$Concentracion)

Datos_2 %>% ggplot(aes(x = Concentracion)) +
  geom_histogram(fill = NA, color = "blue") +
  theme_bw()

Datos_2 %>% filter(Temperatura > 40) %>%
  ggplot(aes(Temperatura, Concentracion)) +
  geom_point() +
  theme_bw()

# Por corriente eléctrica
Datos_2 %>% ggplot(aes(Corriente_elec, Concentracion)) +
  geom_point() +
  theme_bw()

# Por pH
Datos_2 %>% ggplot(aes(pH, Concentracion)) +
  geom_point() +
  theme_bw()
Datos_2 %>% filter(pH < 6) %>%
  ggplot(aes(pH, Concentracion)) +
  geom_point() +
  theme_bw()
Datos_2 %>% filter(pH > 6) %>%
  ggplot(aes(pH, Concentracion)) +
  geom_point() +
  theme_bw()

# Matriz de correlación
correlaciones <- Datos_2 %>%
  select(Num_pasadas, Temperatura, Corriente_elec, pH, Concentracion) %>%
  {round(corr(.), 2)}

corrplot(correlaciones, method="number", type="upper")

Datos_2 %>% ggplot(aes(y = Concentracion)) +
  geom_boxplot(fill = NA, color = "blue") +
  theme_bw()

# 1.2. Bivariado

# Por experimento
Datos_2 %>% ggplot(aes(Experimento, Concentracion)) +
  geom_boxplot(fill = NA, color = "blue") +
  geom_point() +
  theme_bw()

# Por tiempo o número de pasadas
Datos_2 %>% ggplot(aes(factor(Num_pasadas), Concentracion)) +
  geom_boxplot(fill = NA, color = "blue") +
  geom_point() +
  theme_bw()

Datos_2 %>% group_by(Num_pasadas) %>%
  reframe(Min = min(Concentracion),
    Q1 = quantile(Concentracion, 0.25),
    Q2 = quantile(Concentracion, 0.5),
    Media = mean(Concentracion),
    Q3 = quantile(Concentracion, 0.75),
    Max = max(Concentracion))

# Por temperatura
Datos_2 %>%
  ggplot(aes(Temperatura, Concentracion)) +
  geom_point() +
  theme_bw()
Datos_2 %>% filter(Temperatura < 40) %>%
  ggplot(aes(Temperatura, Concentracion)) +
  geom_point() +
  theme_bw()

# 2. Modelamiento----

Datos_model <- Datos_2 %>%
  select(Concentracion,
    Pasadas = Num_pasadas,
    Temperatura,
    Corriente_elec,
    pH)

Datos_model$Pasadas <- factor(Datos_model$Pasadas)

Modelo1 <- lm(Concentracion ~ Pasadas + Temperatura + Corriente_elec + pH, data = Datos)

anova(Modelo1)
summary(Modelo1)
vif(Modelo1)

Modelo2 <- lm(Concentracion ~ Pasadas + Corriente_elec, data = Datos_model)

anova(Modelo2)
summary(Modelo2)
vif(Modelo2)

Modelo3 <- lm(Concentracion ~ Pasadas, data = Datos_model) # Este es el modelo final

anova(Modelo3)
summary(Modelo3)

# 3. Validación de supuestos----
plot(Modelo3)

shapiro.test(Modelo3$residuals)
bptest(Modelo3)

RVAideMemoire::mood.medtest(Datos_model$Concentracion ~ Datos_model$Pasadas)

```

Apéndice R. Procedimiento para la preparación de diluciones seriadas**Preparación de diluciones seriadas**

1. Preparar una solución de agua peptonada tamponada (GranuCult) como medio diluyente, a su vez la preparación del medio de cultivo Agar (Chromocult).
2. Esterilizar en autoclave los Matraces Erlenmeyer con el agua peptona y el medio de cultivo, tubos de ensayo, pipetas, puntas de micropipetas y cajas Petri.
3. Etiquetar los tubos de ensayo con los niveles de dilución correspondientes y organizarlos en una gradilla de manera ordenada. Aplicar una codificación para cada muestra, donde *t0* indica el momento de toma de muestra y *D-1* el nivel de dilución.
4. Al salir del autoclavado, agregar 9 mL de agua peptonada estéril a cada tubo de ensayo y taparlos adecuadamente.
5. Tomar 1 mL de la muestra de agua residual del tanque de almacenamiento y transferirlo al primer tubo con diluyente, logrando una dilución 1:10 (*mL/mL*).
6. Continuar con las diluciones seriadas transfiriendo 1 *mL* del tubo anterior al siguiente, hasta alcanzar la dilución deseada 1×10^{-7} .
7. Homogeneizar cada dilución mediante agitación suave.

Apéndice S. Procedimiento de siembra mediante vertimiento en placa (método de profundidad)

Siembra mediante vertimiento en placa (método de profundidad)

1. Fundir el agar nutritivo y mantenerlo a una temperatura de aproximadamente 45 °C.
2. Verter 1 mL de cada dilución en una caja Petri estéril con ayuda de la micropipeta.
3. Añadir de inmediato entre 15 y 20 mL de agar fundido a cada placa que contiene la muestra.
4. Mezclar el contenido mediante movimientos circulares suaves para lograr una distribución uniforme del inóculo.
5. Dejar solidificar el agar completamente a temperatura ambiente sobre una superficie nivelada y estéril, preferiblemente bajo una campana de extracción.
6. Sellar las cajas Petri con Parafilm y rotularlas según corresponda.
7. Incubar las placas en el INCUBADOR IN30 en posición invertida (boca abajo) a (37°C durante 24 horas para *Escherichia coli*). (American Public Health Association, 2017)
8. Observar periódicamente las cajas durante la incubación para verificar el crecimiento de colonias bacterianas.