

Clean technology for domestic wastewater treatment: dynamic hydrocavitation-ozone

Tecnología limpia para tratamiento de aguas residuales domésticas: hidrocavitación dinámica- OZONO

Elmer Benites Alfaro, Doctor; Carlos Castañeda Olivera, Doctor; Eusterio Acosta Suasnabar, Doctor; Mery Rengifo Pereyra, Br.

Universidad César Vallejo, Perú, ebenitesa@ucv.edu.pe, ccastanedao@ucv.edu.pe, eacostas@ucv.edu.pe, meryrengifo@gmail.com

Abstract- Faced with the global hydrological crisis, the generation of more than 80% of the wastewater discharged into the ecosystem without prior treatment is a serious problem. The research focused on the treatment of wastewater that comes from the domestic activities of an urban housing complex, the same ones that presented organic compounds such as: fats, proteins, blood, urine and feces that imply high values of biological oxygen demand (BOD) and chemical oxygen demand (COD) and fecal coliforms. There are several methods to treat this wastewater; however, the research accounts for the treatment of domestic wastewater through the hydrocavitation and ozone dynamic (HCD-O3) system. The results indicated that it was 100% efficient for the reduction of fecal coliforms after 80 minutes of treatment, while other physicochemical parameters such as oils and fats, BOD and COD were less efficient. The method turns out to be an alternative with environmental advantages by not using chemical products, as well as being easy to implement.

Keywords—Hydrodynamic cavitation, hydrocavitation, wastewater, fecal coliforms, ozone.

Resumen— Ante la crisis hidrológica mundial, la generación de más del 80% de las aguas residuales vertidas al ecosistema sin tratamiento previo es un grave problema. La investigación se centró en el tratamiento de aguas residuales que provienen de las actividades domésticas de un conjunto habitacional urbano, las mismas que presentaban compuestos orgánicos como: grasas, proteínas, sangre, orina y heces que implican altos valores de demanda biológica de oxígeno (DBO) y demanda química de oxígeno (DQO) y coliformes fecales. Existen varios métodos para tratar estas aguas residuales; sin embargo, la investigación da cuenta del tratamiento de aguas residuales domésticas a través del sistema dinámico de hidrocavitación y ozono (HCD-O3). Los resultados indicaron que fue eficiente en un 100% para la reducción de coliformes fecales al cabo de 80 minutos de tratamiento, en cuanto a los otros parámetros fisicoquímicos como aceites y grasas, demanda bioquímica de oxígeno (DBO) y demanda química de oxígeno (DQO) resultó menos eficiente. El método resulta ser una alternativa con ventajas ambientales al no usar productos químicos, además de ser fácil de implementar.

Palabras clave—Cavitación hidrodinámica, hidrocavitación, aguas residuales, coliformes fecales, ozono

I. INTRODUCTION

El tratamiento de aguas contaminadas es importante para la población y para el cuidado del ambiente debido a que es utilizada en la producción de diversos productos de consumo e higiene personal. La generación de aguas contaminadas ha ido en aumento causando un panorama de preocupación en las autoridades de vigilancia y control del agua.

A nivel global, más del 80% de las aguas residuales generadas por la sociedad son devueltas al ecosistema sin un previo tratamiento o reutilización, conllevando a un continuo incremento de la contaminación de los recursos hídricos [1]. Por ello, la agencia de protección ambiental (EPA) de los EEUU ha incentivado a las autoridades públicas de tratamiento de aguas residuales que adopten medidas tarifarias en las que se les cobre a los clientes no residenciales en función de las características específicas de sus aguas residuales generadas, como la demanda bioquímica de oxígeno (DBO), los sólidos suspendidos totales (SST) y el amoníaco (NH_3) [2].

Las aguas residuales provienen de las actividades domésticas e industriales; por ejemplo, en la producción de carne de vacuno se genera efluentes con altas concentraciones de compuestos orgánicos como grasas, proteínas, sangre, orina y heces que implican altos valores de demanda biológica de oxígeno (DBO) y demanda química de oxígeno (DQO) (Juárez et al., 2020), pero también una considerable cantidad de sólidos suspendidos totales (SST), nitrógeno total (NT) y fósforo total (FT) [3]; [4]. Estos indicadores superan muchas veces los límites máximos permisibles señalado por normativas ambientales, en el caso de Perú el DS. 003-2010-MINAM y son dispuestos en cuerpos receptores ocasionando impactos negativos.

En la actualidad se han desarrollado procesos de tratamiento para eliminar los contaminantes en las aguas residuales pero el contenido de materia orgánica en las aguas residuales ocasiona

Digital Object Identifier (DOI):

<http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2022.1.1.780>

ISBN: 978-628-95207-0-5 ISSN: 2414-6390

muchos problemas como la tratabilidad, el ensuciamiento de la membrana y la posible formación de subproductos tóxicos durante el tratamiento de las aguas residuales [5]. Según IANAS [6], los problemas de calidad del agua en las Américas están relacionados con la eutrofización, contaminación química, contaminantes biológicos y otros contaminantes no químicos.

Se necesitan tecnologías más ecológicas con alta eficiencia y rentabilidad para degradar y mineralizar los contaminantes recalcitrantes del agua. Con estas características es la hidrocavitación dinámica o cavitación dinámica que ha ganado atención en el tratamiento de aguas residuales debido a su escalabilidad, su alta eficiencia energética, la minimización del uso de disolventes tóxicos y el diseño más sencillo del reactor [7].

Las aguas residuales son cada vez más abundantes y son vertidas a los cuerpos receptores muchas veces sin un tratamiento, perjudicando la flora y fauna de las aguas superficiales y subterráneas, así como cuando llegan a los mares. El tratamiento y recuperación de estas aguas en plantas de tratamiento requieren a veces una gran infraestructura con métodos tradicionales y en otro consumo de productos químicos, por lo que es necesario buscar otras tecnologías ambientalmente amigables, el tratamiento de estas aguas por cavitación hidrodinámica-ozono es una de estas alternativas. Este proceso es una técnica de oxidación eficiente basado en la formación de cavidades debido a la caída de presión por debajo de la presión de vapor del líquido producido por un dispositivo cavitador (placa de orificio o Venturi) y luego al retomar y recuperar la presión aguas abajo por aumento del área de flujo ocurre el colapso de la cavidades (burbujas) con la consecuente generación de energía aumento y temperatura, que produce radicales libres con efectos químicos que degradan a los contaminantes [8]. La presencia de Ozono permite una oxidación rápida en eliminación de sustancias tóxicas y no degradables de microorganismos por su poder oxidativo y formación de radicales hidroxilos (OH) [9].

Por lo tanto, la investigación tuvo como objetivo tratar las aguas residuales con carga orgánica proveniente de actividades domésticas, mediante el sistema hidrocavitación dinámica - ozono (HCD+O₃), con ventajas de mejoramiento ambiental de los ecosistemas y recuperación de aguas residuales.

II. METODOLOGÍA

La investigación fue realizada con las siguientes etapas:

A. Obtención de la muestra de agua residual

Seguendo el protocolo de monitoreo de la calidad de los efluentes de las plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas o municipales, del Ministerio de Vivienda y Construcción, se recogió la muestra de agua residual doméstica (60 litros) de la Planta de tratamiento del conjunto habitacional “Condominio Valle Grande” sito en la av. San Pedro de Choque - Puente Piedra.

B. Caracterización inicial de la muestra

Para determinar las propiedades iniciales de la muestra antes del tratamiento se midió los parámetros de campo de pH, Temperatura, conductividad eléctrica y salinidad.

Además, la muestra fue llevada al laboratorio para el análisis de los parámetros fisicoquímicos teniendo en cuenta los métodos y referencias normalizados que se muestran en la Tabla I.

TABLE I
MÉTODOS Y REFERENCIAS DE ANÁLISIS

Parámetro	Método
Aceites y Grasas	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 5520 B, 23 rd Ed
Carbono Orgánico Total	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 5220 D, 23 rd Ed. 2017
Coliformes Fecales (Termotolerantes) (NMP) 2	SMEWW-APHA AWWA-WEF.Part9221 F1, 23 rd Ed.2017.
Demanda Bioquímica de Oxígeno	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 5210 B, 23 rd Ed. 2017
Demanda Química de Oxígeno	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 5220 D, 23 rd Ed. 2017
Nitrógeno Amoniacal	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 4500-NH3 D, 23 rd Ed. 2017
Oxígeno Disuelto	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 4500-O G. 23rd Ed. 2017
Sólidos Suspendidos Totales	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 2540 D, 23 rd Ed. 2017
Turbidez	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 2130 B 23rd Ed. 2017

C. Tratamiento de agua residual por hidrocavitación dinámica-ozono

Se realizó utilizando el equipo de cavitación hidrodinámica con dispositivo de ozonificación (Fig. 1), facilitado por la Empresa PROMEC Ingenieros SAC., con las características de:

Presión de ingreso del agua residual: 8 -8.2 bar

Flujo de ingreso del agua residual: 80 L/min

Dispositivo cavitador: Tubo Venturi

Ozonificador: 10 g/h

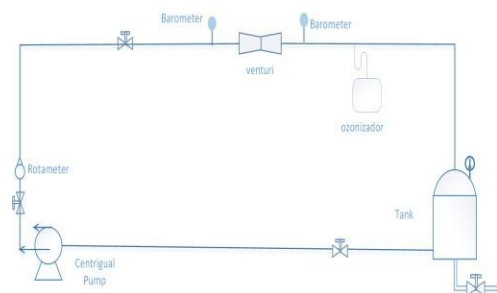


Fig. 1 Diagrama de sistema de cavitación hidrodinámica

D. Análisis de agua residual después del tratamiento

La muestra tratada fue llevada a un laboratorio certificado por INACAL para el análisis de los principales parámetros fisicoquímicos del agua residual (Fig. 2). Se evaluaron aquellos parámetros considerados en la normatividad ambiental de Perú relacionado a los límites máximos permisibles (LMP) para aguas residuales domésticas para plantas de tratamiento, y adicionalmente otros más de interés.



Fig. 2 Muestras de agua residual doméstica tratadas

III. RESULTADOS

A. Parámetros fisicoquímicos iniciales de la muestra

La muestra de agua residual usada en la investigación genera da en el Conjunto habitacional Condominio Valle Grande, fue homogenizada por 5 minutos en el equipo de hidrocavitación dinámica complementado con un equipo de ozono; esta muestra presentó un pH de 7.71, temperatura de 34 °C, conductividad eléctrica de 823 μ S/cm y salinidad de 0.04 %. Asimismo, se determinó los parámetros fisicoquímicos encontrando el nivel que se indica en la Tabla II, en donde destaca la elevada carga de coliformes fecales, como era de esperarse por ser agua residual doméstica

TABLE II
PARÁMETROS FÍSICO QUÍMICOS INICIALES DEL AGUA RESIDUAL

Parámetro	Unidades	Valor
Aceites y Grasas	mg/L	16.40
Carbono Orgánico Total	mgCOT/L	98.94
Coliformes Fecales (Termotolerantes) (NMP)	NMP/100mL	1600000000
Demanda Bioquímica de Oxígeno	mgBOD ₅ /L	180.00
Demanda Química de Oxígeno	(mg O ₂ /L)	395.80
Nitrógeno Amoniacal	(mg N-NH ₃ /L)	53.514
Oxígeno Disuelto	mgDO/L	0.48
Sólidos Suspendidos Totales	mg/L	39.0
Turbidez	NTU	39.90

B. Parámetros fisicoquímicos después del tratamiento

Durante el proceso de tratamiento por hidrocavitación dinámica-ozono, se observó que el pH se mantuvo entre 7.71 y 8.56. La temperatura del agua en el proceso tuvo un incremento conforme avanzaba el tiempo de tratamiento. Ver la Tabla III.

TABLE III
TEMPERATURA DEL AGUA EN EL PROCESO DE TRATAMIENTO

Tiempo (min)	pH	Temperatura (°C)
0	7.71	34.5
40	8.56	47.1
80	8.24	55.2
120	8.27	59.9
160	8.33	62.1

Luego del tratamiento por el tiempo de 40 minutos, se observó una disminución de aceites y grasas, coliformes fecales, Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅), Demanda Química de Oxígeno (DQO), Oxígeno Disuelto (OD) y Nitrógeno Amoniacal. Por el contrario, sucede un aumento de carbono orgánico total (COT), Sólidos suspendido totales (SST), y la turbidez. Ver Tabla IV

TABLA IV
PARÁMETROS FÍSICO QUÍMICOS DEL AGUA DESPUÉS DEL TRATAMIENTO CON HIDROCAVITACIÓN DINÁMICA

Parámetro	Unidades	Valor (a los 40 min de tratamiento)
Aceites y Grasas	mg/L	10.10
Carbono Orgánico Total	mgCOT/L	110.30
Coliformes Fecales (Termotolerantes) (NMP)	NMP/100mL	3.50E+09
Demanda Bioquímica de Oxígeno	mgBOD ₅ /L	161.40
Demanda Química de Oxígeno	(mg O ₂ /L)	365.70
Nitrógeno Amoniacal	(mg N-NH ₃ /L)	46924.00
Oxígeno Disuelto	mgDO/L	0.33
Sólidos Suspendidos Totales	mg/L	102.00
Turbidez	NTU	105.00

C. LMP y Parámetros fisicoquímicos después del tratamiento

Los límites máximos permisibles (LMP) para los efluentes de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales

Domésticas o Municipales, establecido por el Decreto Supremo N.º 003-2010-MINAM (Perú) [10], se muestran en la Tabla V, comparándolo con los resultados a los 40 minutos del tratamiento. Asimismo, en dicha tabla también se determina el porcentaje de variación de los parámetros.

TABLA V
COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS DE PARÁMETROS FÍSICOQUÍMICOS DEL AGUA DESPUÉS DEL TRATAMIENTO, CON LOS LMP (PERÚ)

Parámetro	Unidades	LMP (DS. 03-2010-MINAM)	Valor (a los 40 min de tratamiento)	Porcentaje de variación (%)
Aceites y Grasas	mg/L	20	10.10	Disminuye: 38 %
Coliformes Fecales (Termotolerantes) (NMP)	NMP/100mL	10000	3.50E+09	Disminuye: 78 %
Demanda Bioquímica de Oxígeno	mgBOD ₅ /L	100	161.40	Disminuye: 10 %
Demanda Química de Oxígeno	(mg O ₂ /L)	200	365.70	Disminuye: 8 %
Sólidos Suspendidos Totales	mg/L	150	102.00	Aumenta: 162 %
pH	s.u.	6.5-8.5	8.56	Aumenta: 10 %
Temperatura	°C	<35	47.10	Aumenta: 37 %

La investigación también dio como resultados que a los 80 minutos de tratamiento los coliformes fecales tuvo una disminución del 99.9999 % muy cerca a los 100%; sin embargo, los demás parámetros no dieron resultado favorable de reducción que se buscaba .

IV. DISCUSIÓN

La hidrocavitación dinámica o cavitación hidrodinámica es un fenómeno físico hidrodinámico que ocurre cuando sin la influencia de la temperatura, el agua en estado líquido cambia al estado de vapor debido a que el fluido al pasar a gran velocidad por un elemento cavitador, la presión presente alcanza a la presión de vapor del mismo, generando cavidades (burbujas) que posteriormente aguas abajo al encontrarse en regiones con presiones más elevadas ocurre el colapso de las cavidades (aplastamiento ó implosión), el vapor regresa a líquido de manera súbita, existe intensa turbulencia, se forman vórtices, pulsaciones de velocidad, presión y temperatura, este fenómeno ofrece grandes beneficios tales como la acción dispersante de los líquidos en el proceso, letalidad de microorganismos [11]

El tratamiento con tecnología HCD+O₃ elimino 38 % de aceites y grasas del efluente doméstico, la efectividad alcanzada pueda se debe a la capacidad de la HC de formar los

radicales libres y la acción de altas temperaturas que destruyen los contaminantes inorgánicos [12], por lo tanto la tecnología hidrodinámica con el O₃ son efectivos para eliminar los aceites y grasas en el efluente; sin embargo, esta acondicionado su efectividad a la temperatura que se presente y presión de ingreso a considerar en la operación [13].

En relación a los coliformes Termotolerantes presentes en el agua residual doméstica se eliminó el 99.99 %, debido a las condiciones de alta temperatura, presión y O₃ ya mencionadas. La literatura científica corrobora que la cavitación hidrodinámica elimina eficazmente los contaminantes orgánicos y microorganismos, estando relacionada la desinfección con la presión y el tiempo de reacción [14], hecho que fue corroborado en el trabajo de sobre tratamiento de por cavitación hidrodinámica -ozono para disminución de la carga orgánica y nitrogenada en aguas residuales de camal [15]. Asimismo, se indican que para lograr una mayor desinfección y en menos tiempo se debe operar a presiones altas [16]

La Demanda Bioquímica del Oxígeno, también se redujo después del tratamiento por 40 minutos en un 10 %. A tiempos mayores de tratamiento por este método no se logró mayor reducción, al contrario, se revertió la disminución, esto pueda deberse a la presencia de gran cantidad de cavidades (burbujas) que se genera en el proceso, formándose una especie de “colchón” quedando poco espacio para la implosión de las burbujas [12].

También se reduce a los 40 minutos el valor de Demanda Química del Oxígeno (DQO) respecto al valor inicial, conforme a estudios que indican que los productos en materia orgánica de pequeño peso molecular a partir de compuestos orgánicos macromoleculares componentes de la DQO, pueden eliminarse en gran proporción mediante la cavitación hidrodinámica debido a que en el proceso se originan radicales OH (de alto poder oxidación) al momento de la implosión de las cavidades [17]; sin embargo, la HC a pesar de su alta capacidad oxidativa para eliminar algunos contaminantes orgánicos, tóxicos y bio-refractarios, aún quedan diversos aspectos por evaluar [18], uno de los factores importante en la reducción de la DQO es la “presión”, en una investigación se demostró que fue mayor la eliminación de contaminante operando a menos de 1.01325 bar [13]. Para la investigación los resultados corresponden a una presión de ingreso de 8 a 8.2 bar, la caída de presión se alcanzó con un dispositivo Venturi para originar las cavidades (burbujas), presentando buena eficiencia [19]

Debido a la presencia de contaminantes orgánicos en el agua residual doméstica, el oxígeno disuelto disminuye a los 40 minutos de tratamiento, se produce la oxigenación del agua, pero esta concentración de oxígeno disuelto en el efluente no solo se ve influenciada por las concentraciones de la carga orgánica, sino también por el aumento de la temperatura de efluente [20]

Los Sólidos Suspendidos Totales a los 40 minutos de tratamiento aumentó considerablemente con respecto al valor

inicial, esto puede ser el producto de la acción del tratamiento, en donde la presencia de una alta carga de material particulado se dispersa en tamaños menores. La reacción química y mecánica ante la HCD + O₃ es fundamental en la eliminación de los sólidos suspendidos totales, debido a que la interacción partículas con las cavidades (burbujas) presentes, se produce la flotación en forma eficiente para ser separados [21]. Como consecuencia de lo anterior mencionado la turbidez aumentó con el tratamiento HCD + O₃. Con este método de tratamiento se tiene más ventaja en la eliminación de los contaminantes en el efluente al darse también la descomposición térmica y el ataque de las moléculas por los radicales hidroxilos [12]

V. CONCLUSIÓN

Se establece que el sistema de la hidrocavitación dinámica – ozono, permitió mejorar la calidad de las aguas residuales domésticas, reduciendo en forma eficiente los coliformes fecales en 78 % a los 40 minutos y en un 100 % a los 80 minutos. En cuanto a los demás parámetros fisicoquímicos se obtuvo una eficiencia relativa como en el caso de los aceites y grasas. En general lo importante es que se redujo los parámetros comprendidos dentro de los LMP de la legislación ambiental a excepción del DBO y DQO que disminuyó, pero no alcanzó el nivel deseado.

De esta manera la HCD+O₃ resulta conveniente y con ventajas ambientales al no usar ni generar productos químicos, es de aplicación práctica y fácil implementación e incluso presenta eficiencia energética en la reducción de ciertos contaminantes, clarificación de agua, homogenización de los sólidos, entre otras aplicaciones en los últimos tiempos, por lo que se requiere ampliar las investigaciones para establecer estándares en el empleo de esta tecnología.

ACKNOWLEDGMENT

Se expresa el agradecimiento a la Universidad César Vallejo por el apoyo financiero para la ejecución de la presente investigación, dentro del Programa de Fondos de Apoyo a la Investigación Docente-INVESTIGA UCV (RVI 201-2021-UCV, Proyecto INB-08).

REFERENCES

[1] UNESCO, «Día Mundial del Agua 2017 | Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura», *Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura*, 2017. <http://www.unesco.org/new/es/unesco/events/prizes-and-celebrations/celebrations/international-days/world-water-day-2017/> (accedido 18 de marzo de 2022).

[2] R. A. Garcia, C. Nieman, R. A. Haylock, K. Rosentrater, y G. Piazza, «The effect of chicken blood and its components on wastewater characteristics and sewage surcharges», *Poultry science*, 2016, doi: 10.3382/ps/pew114.

[3] C. F. Bustillo-Lecompte y M. Mehrvar, «Slaughterhouse wastewater characteristics, treatment, and management in the meat processing industry: A review on trends and advances», *J Environ Manage*, vol. 161, pp. 287-302, sep. 2015, doi: 10.1016/j.jenvman.2015.07.008.

[4] A. V. Luchese, A. Algeri, P. C. Conceição, y A. J. Sato, «Ambiental impacts caused by the application of poultry slaughterhouse wastewater on soils», *RSA*, vol. 18, n.º 2, p. 77, 2017, doi: 10.5380/rsa.v18i2.50688.

[5] B. H. Gursoy-Haksevenler y I. Arslan-Alaton, «Effects of treatment on the characterization of organic matter in wastewater: a review on size distribution and structural fractionation», *Water Sci Technol*, vol. 82, n.º 5, pp. 799-828, sep. 2020, doi: 10.2166/wst.2020.403.

[6] IANAS La Red Interamericana de Academias de Ciencias, *Calidad del Agua en las Américas Riesgos y Oportunidades*. 2019.

[7] S. Das, A. P. Bhat, y P. R. Gogate, «Degradation of dyes using hydrodynamic cavitation: Process overview and cost estimation», *Journal of Water Process Engineering*, vol. 42, p. 102126, ago. 2021, doi: 10.1016/j.jwpe.2021.102126.

[8] A. P. Bhat, C. R. Holkar, A. J. Jadhav, y D. V. Pinjari, «Acoustic and hydrodynamic cavitation assisted hydrolysis and valorisation of waste human hair for the enrichment of amino acids», *Ultrasonics Sonochemistry*, vol. 71, p. 105368, mar. 2021, doi: 10.1016/j.ultsonch.2020.105368.

[9] P. Li, R. Miao, P. Wang, F. Sun, y X. Li, «Bi-metal oxide-modified flat-sheet ceramic membranes for catalytic ozonation of organic pollutants in wastewater treatment», *Chemical Engineering Journal*, vol. 426, p. 131263, dic. 2021, doi: 10.1016/j.cej.2021.131263.

[10] MINAM, «Aprueba Límites Máximos Permisibles para los efluentes de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas o Municipales», vol. Normas legales-El Peruano. 2010. [En línea]. Disponible en: https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/385530/Decreto_Supremo_N_003-2010-MINAM20191013-25586-d53q2p.pdf

[11] J. A. D. Dominguez, «La Cavitación Hidrodinámica», *Anuario Ciencia en la UNAH*, vol. 16, n.º 1, Art. n.º 1, 2018, Accedido: 16 de mayo de 2021. [En línea]. Disponible en: <https://revistas.unah.edu.cu/index.php/ACUNAH/article/view/1008>

[12] G. Mancuso, M. Langone, y G. Andreottola, «A critical review of the current technologies in wastewater treatment plants by using hydrodynamic cavitation process: principles and applications», *J Environ Health Sci Eng*, vol. 18, n.º 1, pp. 311-333, jun. 2020, doi: 10.1007/s40201-020-00444-5.

[13] R. Y. Lozano Morillo, «Aplicación de la tecnología de cavitación hidrodinámica, ozono y oxígeno atmosférico para la mejora de la calidad de aguas residuales de la empresa de Curtiembre Lima 2020», *Repositorio*

- Institucional - UCV*, 2020, Accedido: 18 de marzo de 2022. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/67566>
- [14] Z. Liu, M. Zhu, C. Deng, H. Su, P. Chen, y Z. Wang. «Pollutant and Microorganism Removal From Water by Hydrodynamic Cavitation», *The Open Biotechnology Journal*, vol. 10, n.º 1, ju l. 2016, doi: 10.2174/1874070701610010258.
- [15] C. F. Cadenas Castro y B. M. Santos Padilla, «Ozono y cavitación hidrodinámica para disminución de la carga orgánica y nitrogenada en aguas residuales de camal, 2020», *Repositorio Institucional - UCV*, 2020, Accedido: 18 de marzo de 2022. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/56568>
- [16] E. F. L. Flores y H. A. L. Cevallos, «Desinfección bacteriana de aguas residuales utilizando cavitación hidrodinámica a través de un tubo Venturi», *Congreso de Ciencia y Tecnología ESPE*, vol. 13, n.º 1, Art. n.º 1, jun. 2018, doi: 10.24133/ctespe.v13i1.808.
- [17] Z. Liu, M. Zhu, C. Deng, H. Su, P. Chen, y Z. Wang. «Pollutant and Microorganism Removal From Water by Hydrodynamic Cavitation», *The Open Biotechnology Journal*, vol. 10, pp. 258-264, jul. 2016, doi: 10.2174/1874070701610010258.
- [18] J. Vilarroig Herrera, «Diseño y análisis de un sistema de cavitación hidrodinámica mediante el uso de técnicas CFD para su utilización en sistemas de pretratamiento de fangos en las estaciones de aguas residuales», Ph.D. Thesis, Universitat Jaume I, 2021. doi: 10.6035/14107.2021.192015.
- [19] L. F. Gutiérrez-Mosquera, S. Arias-Giraldo, y D. F. Cardona-Naranjo, «Cavitación Hidrodinámica: un Enfoque desde la Ingeniería y la Agroindustria», *Scientia Et Technica*, vol. 24, n.º 2, pp. 283-304, 2019.
- [20] E. R. Lecca y E. R. Lizama, «Caracterización de las aguas residuales y la demanda bioquímica de oxígeno», *Industrial Data*, vol. 17, n.º 1, pp. 71-80, 2014.
- [21] J. M. Sokolović y S. Miskovic, «The effect of particle size on coal flotation kinetics: A review», *Physicochem. Probl. Miner. Process.*, vol. 54, n.º 4, pp. 1172-1190, jul. 2018, doi: 10.5277/ppmp18155.