



UNIVERSIDAD CÉSAR VALLEJO

**FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL**

**Uso de micro/nanoburbujas para el tratamiento de efluentes
contaminados: Una revisión sistemática y metaanálisis**

**TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE:
Ingeniero Ambiental**

AUTORES:

Belahonia Talledo, Renato Leonel (ORCID: 0000-0001-5600-8448)

Garcia Espejo, Lucero Marielena (ORCID: 0000-0003-0085-2003)

ASESOR:

Dr. Castañeda Olivera, Carlos Alberto (ORCID: 0000-0002-8683-5054)

LÍNEA DE INVESTIGACIÓN:

Tratamiento y Gestión de los Residuos

LIMA - PERÚ

2021

Dedicatoria

La presente investigación está dedicada a todas las personas que hicieron posible que culminemos este proyecto, principalmente a mi compañera Lucero García, mis padres, compañeros del curso que siempre estuvieron ahí para darnos la mano y a todos los interesados en el tratamiento de aguas residuales.

— Renato Leonel Belahonia Talledo

Dedico esta tesis a todos aquellos que me motivaron para seguir adelante y poder culminar esta meta; principalmente a mi compañero Renato Leonel Belahonia Talledo por su apoyo constante en nuestro proyecto, a mis padres por alentarme a continuar y su apoyo económico. Finalmente, a mi asesor de tesis y compañeros del curso.

— Lucero Marielena García Espejo

Agradecimientos

Agradecemos a nuestros padres por el apoyo, consejos y motivación de continuar en culminar nuestra tesis a pesar de los obstáculos que se presentaron durante el transcurso de nuestro desarrollo tanto profesional como personal. Asimismo, a la universidad y sus docentes por la formación impartida. Finalmente, a nuestro asesor Carlos Castañeda Olivera por su paciencia, guía y apoyo constante durante todo el desarrollo de nuestro proyecto.

— Renato Belahonia y Lucero García

Índice de contenido

Índice de figuras	5
Índice de tablas	6
Resumen	7
Abstract	8
I. INTRODUCCIÓN	1
II. MARCO TEÓRICO	4
III. METODOLOGÍA	12
3.1. Tipo y diseño de investigación	12
3.2. Variables y operacionalización	12
3.3. Población, muestra y muestreo	13
3.4. Técnicas e instrumentos de recolección de datos	13
3.4.1. Validez y confiabilidad de los instrumentos	14
3.5. Procedimientos	15
3.5.1. Identificación de las fuentes	16
3.5.2. Filtración preliminar	17
3.5.3. Filtración en base a los criterios de inclusión y exclusión establecidos	17
3.5.4. Análisis de resultados	18
3.5.5. Elaboración del metaanálisis	18
3.5.6. Elaboración de las conclusiones	18
3.6. Método de análisis de datos	18
3.7. Aspectos éticos	19
IV. RESULTADOS	20
V. DISCUSIÓN	37
VI. CONCLUSIONES	41
VII. RECOMENDACIONES	42
REFERENCIAS	43
ANEXOS	51

Índice de figuras

Figura 1. Evolución temporal de la concentración de DQO en el afluente y el efluente (Fuente: Liu et al., 2018).....	5
Figura 2. Reducción del DBO ₅ (Fuente: Núñez et al., 2017)	8
Figura 3. Efecto del tamaño de burbujas de 2 μm y 0.7 μm sobre la eficiencia de la unión en cada caso (Fuente: Kim et al., 2020)	9
Figura 4. Flujograma de las etapas para la realización de la revisión sistemática y metaanálisis.....	16
Figura 5. Flujograma de los procesos de obtención de los artículos seleccionados para el metaanálisis	20
Figura 6. Metaanálisis de la eficiencia de remoción del contaminante DBO ₅ , posterior al tratamiento con micro/nanoburbujas.....	33
Figura 7. Gráfico de comparación de eficiencia de remoción de DBO ₅	34
Figura 8. Metaanálisis de la eficiencia de remoción del contaminante DQO, posterior al tratamiento con micro/nanoburbujas.....	35
Figura 9. Gráfico de comparación de eficiencia de remoción de DQO	36

Índice de tablas

Tabla 1. Desviación media y estándar de los indicadores de la calidad del agua tratada por nanoburbujas.....	7
Tabla 2. Comparación de análisis de muestra	7
Tabla 3. Concentraciones iniciales y finales de tricloroetileno (TCE) en aguas subterráneas.....	8
Tabla 4. Técnicas e instrumentos de recolección de datos.....	14
Tabla 5. Especialistas que validaron los instrumentos	15
Tabla 6. Estrategias de búsqueda de literatura.....	17
Tabla 7. Síntesis, recolección y selección de estudio para revisión sistemática y metaanálisis.....	22
Tabla 8. Síntesis y recolección de efluentes y parámetros específicos de los estudios seleccionados	25
Tabla 9. Parámetros previa y posterior a la aplicación de la técnica de micro/nanoburbujas en los estudios seleccionados.....	28
Tabla 10. Síntesis de eficiencia de remoción de los parámetros.....	30
Tabla 11. Calidad metodológica de los estudios seleccionados, a través de la escala Newcastle – Ottawa.....	31
Tabla 12. Datos sintetizados para realizar el metaanálisis con el contaminante DBO ₅	32
Tabla 13. Datos sintetizados para realizar el metaanálisis con el contaminante DQO	34

Resumen

El deterioro de la calidad del agua es un problema grave que sigue enfrentando el medio ambiente ya que año tras año se siguen vertiendo aguas residuales sin tratamiento alguno a los cuerpos hídricos. La presente investigación de revisión sistemática y metaanálisis tuvo como objetivo evaluar la eficiencia de micro/nanoburbujas (MNBs) en el tratamiento de efluentes contaminados. La investigación fue de enfoque cuantitativo, tipo aplicada, diseño no experimental y nivel descriptivo. Los artículos científicos fueron recolectados principalmente de las bases de datos Scopus y Web of Science desde el periodo de enero de 2011 hasta noviembre de 2021. Los resultados mostraron que solo cinco investigaciones fueron incluidas y sometidas a un metaanálisis en el software Review Manager (RevMan). Estos estudios indicaron que el tratamiento con MNBs alcanzó a remover entre un 69 a 100% de DBO₅, y desde un 68 a 99% de DQO en diferentes efluentes contaminados. La mejor eficiencia de remoción de DQO (97%) y de DBO₅ (100%) fue alcanzada en la investigación de Rameshkumar et al. (2019). Finalmente, se concluye que las MNBs reducen de manera eficaz los contaminantes presentes en las aguas residuales.

Palabras clave: revisión sistemática, metaanálisis, micro/nanoburbujas, tratamiento de aguas.

Abstract

The deterioration of water quality is a serious problem that the environment continues to face since year after year untreated wastewater continues to be discharged into water bodies. This systematic review and meta-analysis research aimed to evaluate the efficiency of micro/nanobubbles (MNBs) in the treatment of contaminated effluents. The research had a quantitative approach, applied type, non-experimental design and descriptive level. The scientific articles were collected mainly from the Scopus and Web of Science databases from January 2011 to November 2021. The results showed that only five investigations were included and were subjected to a meta-analysis in the Review Manager software (RevMan). These studies indicated that the treatment with MNBs was able to remove between 69 and 100% of BOD₅, and from 68 to 99% of COD in different contaminated effluents. The best removal efficiency of COD (97%) and of BOD₅ (100%) was achieved in the research by Rameshkumar et al. (2019). Finally, it is concluded that the MNBs effectively reduce the contaminants present in wastewater.

Keywords: systematic review, meta-analysis, micro/nanobubbles, water treatment.

I. INTRODUCCIÓN

Los efluentes contaminados son aguas residuales con desechos sólidos, líquidos y/o gaseosos emitidos por toda vivienda y/o industria, que por lo regular son vertidos hacia cuerpos de agua sin previo tratamiento. Esta contaminación es una de las grandes problemáticas que sigue enfrentando el medio ambiente, ya que su vertimiento en las cuencas hidrográficas genera una alteración del ciclo trófico de la naturaleza, impactando significativamente tanto el entorno ambiental como en la salud pública (Álvarez & Ríos, 2020).

Se estima que en el planeta más del 80 por ciento de los efluentes contaminados se vierte al medio ambiente sin tratamiento alguno, destacando el deterioro de la mayor parte de ríos de África, Asia y América Latina, cuya calidad de agua es cada vez peor con el pasar de los años (WWAP, 2017).

El Perú no es ajeno a esto, dado que la contaminación de ríos y mares provocada por la industria minera y petrolera, es recurrente en el país, trayendo consecuencias evidentes, por ejemplo: la provincia de Lambayeque fue declarada en estado de emergencia a causa de la contaminación del agua potable con arsénico (MINSA, 2020).

Otro ejemplo claro es el río Rímac, donde existen más de 900 puntos de contaminación generado por la población debido al desmonte, actividades industriales, aguas residuales y otros tipos de contaminantes (ANA, 2020) (SEDAPAL, 2020).

El Instituto Nacional de Estadística e Informática del Perú en el 2014, manifestó que en Lima Metropolitana se generó 1 202 286 m³ de aguas residuales, de las cuales únicamente se trataron el 21.2%. En el 2014, en Lima Metropolitana se encontraban 43 plantas de tratamiento de aguas residuales, 21 de las cuales eran administradas por SEDAPAL, 8 por municipalidades distritales y el resto por otras instituciones como universidades, colegios, clubes, entre otros (Collacci, 2018).

A pesar de que las plantas de tratamiento de aguas residuales en Perú utilizan tecnologías como lagunas de estabilización (lagunas facultativas, lagunas de maduración y lagunas aireadas), lodos activados y filtros percoladores (OEFA, 2014), aún no son suficientemente eficientes para poder incrementar el porcentaje de aguas residuales tratadas antes de su vertimiento.

El uso de micro/nanoburbujas (MNBs) en el tratamiento de aguas ha tomado más relevancia en las últimas décadas debido a sus múltiples aplicaciones en diferentes campos, incluyendo ingeniería biomédica, agricultura, nanomateriales, industrial, ambiental, entre otros (Takahashi, 2009). Estas poseen una gran estabilidad, la cual ayuda en la disminución de la fuerza flotante y la presencia de fuerzas repulsivas de tales burbujas entre sí (Vásquez, 2020), esto quiere decir que las MNBs mejoran la disolución del gas y la transferencia de masa, lo que proporciona mayor oxigenación en los efluentes y acelera el proceso de oxidación de la materia orgánica.

Para la **formulación del problema general** se realizó la siguiente pregunta a través de la revisión sistemática y metaanálisis: ¿Cuál es la eficiencia del uso de micro/nanoburbujas para el tratamiento de efluentes contaminados?, y como **problemas específicos**: ¿Cuáles son los contaminantes que presentan mayor eficiencia de remoción posterior al tratamiento con micro/nanoburbujas? y ¿Cuáles son las características óptimas que deben presentar las micro/nanoburbujas para obtener resultados favorables en su uso en el tratamiento de efluentes contaminados?

La presente investigación se justifica desde un enfoque ambiental permitiendo la evaluación de una nueva técnica que podría contribuir al tratamiento de efluentes contaminados, mitigando de esa forma los impactos significativos de la contaminación de los cuerpos hídricos. Asimismo, desde el enfoque social, se continuará contribuyendo a nuevos conocimientos con respecto a la técnica de remediación de efluentes contaminados con micro/nanoburbujas y desde un enfoque económico, este tratamiento alternativo representa la mejora de la calidad

de aguas superficiales, lo cual conlleva a mejores volúmenes de cosecha para la industria pesquera.

Para responder los problemas expuestos anteriormente se planteó como **objetivo general**: determinar la eficiencia del uso de micro/nanoburbujas para el tratamiento de efluentes contaminados; siendo los **objetivos específicos**: identificar los contaminantes que lograron reducir significativamente su concentración después del tratamiento de micro/nanoburbujas e identificar las características óptimas que deben presentar las micro/nanoburbujas para obtener resultados favorables en su uso en el tratamiento de efluentes contaminados.

La presente investigación estableció como **hipótesis** que la aplicación de micro/nanoburbujas es eficiente para el tratamiento de efluentes contaminados.

II. MARCO TEÓRICO

En general, las burbujas pueden ser clasificadas según su tamaño como: nanoburbujas, aquellas con un diámetro inferior a 1 μm ; microburbujas, aquellas con un diámetro entre 1 y 100 μm ; y macroburbujas, aquellas con un diámetro superior a 100 μm (Batagoda, 2007).

Las micro/nanoburbujas tienen la capacidad de cambiar las propiedades normales del agua, mientras que una burbuja regular sube rápidamente a la superficie, la micro/nanoburbuja se hunde y permanece en el agua a largo plazo (de 70 a más días), y de esta manera se proporciona oxígeno al agua (Baram et al., 2010). Además, debido a su alta presión interna (3 – 10 atm), estas poseen alta solubilidad en líquidos (Attard, 2013) y una gran estabilidad, la cual ayuda en la disminución de la fuerza flotante y la presencia de fuerzas repulsivas de tales burbujas entre sí (Vásquez, 2020).

Las micro/nanoburbujas mejoran la disolución del gas debido a su minúsculo tamaño, por lo tanto, la transferencia de masa es la que proporciona mayor oxigenación en los efluentes contaminados y acelera el proceso de oxidación de la materia orgánica contaminante. Por esto, se dice que las principales propiedades de las micro/nanoburbujas son su alta estabilidad, longevidad y rápida adhesión a superficies hidrofóbicas. Estas particularidades amplían las potenciales aplicaciones de las micro/nanoburbujas en muchas áreas, como el revestimiento y limpieza de superficies, la eliminación de contaminantes, la mejora del sistema energético, la medicina, la agricultura y la aceleración del metabolismo en especies vegetales y/o animales (Azevedo et al., 2016).

Los principales factores que influyen en la eficiencia de la transferencia de masa es el tamaño y la concentración de las micro/nanoburbujas, debido a que, las burbujas más pequeñas presentan una gran área de superficie específica y una alta presión interna, mejorando de manera significativa la tasa de aumento y de esa manera la biodegradabilidad de los contaminantes (Hu & Xia, 2017).

La aplicación de las micro/nanoburbujas pueden estar acompañadas de técnicas que mejoren su aplicación, en el caso de Liu, C. et al. (2018) trataron efluentes industriales usando la combinación de ozonificación catalítica de microburbujas junto con un proceso biológico en un biorreactor. Inicialmente, el efluente se trató solo en el biorreactor obteniendo resultados de 6.4% de la degradación de la DQO influyente y luego la actividad de la biopelícula se inhibió completamente. Esto indicó que el tratamiento biológico directo en el efluente era ineficaz debido a su muy pobre biodegradabilidad. Sin embargo, la remoción de DQO fue más eficiente en el biorreactor después del tratamiento de ozonización catalítica de microburbujas, donde la biodegradabilidad del efluente de carbonización mejoró significativamente.

El BR (biorreactor) influent es el agua residual que ingresa directo al biorreactor, mientras que el BR (biorreactor) effluent es agua residual con el tratamiento previo de ozonificación catalítica con microburbujas ingresando al biorreactor. La mayor eficiencia de remoción de DQO se presentó en el BR effluent, gracias a su tratamiento previo con microburbujas (Ver Figura 1).

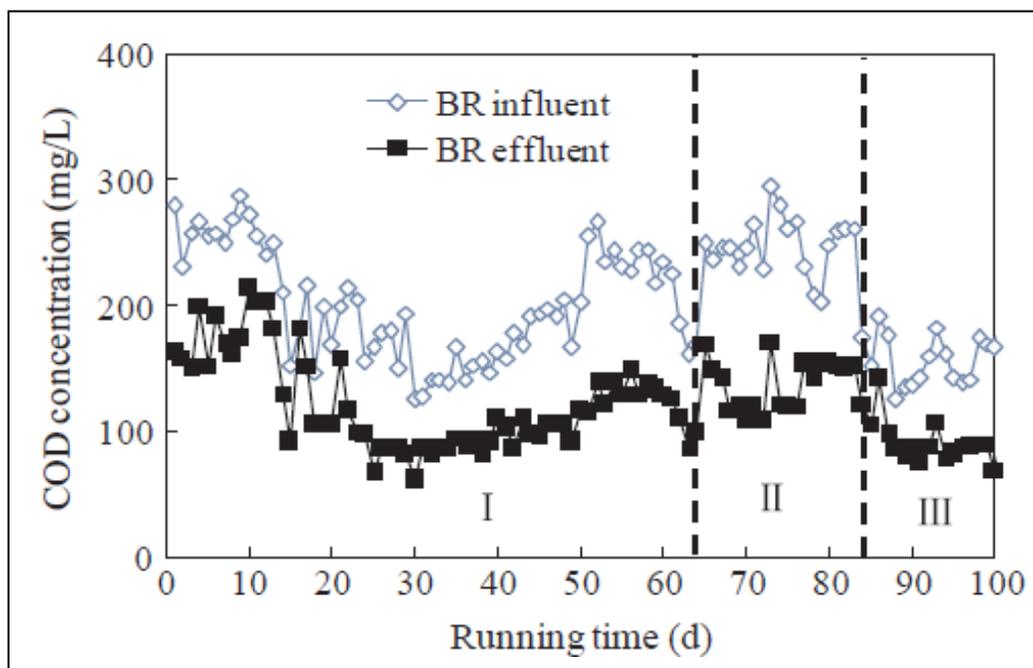


Figura 1. Evolución temporal de la concentración de DQO en el afluente y el efluente (Fuente: Liu et al., 2018).

Azevedo et al. (2017) combinaron la técnica de inyección de nanoburbujas con flotación por aire disuelto (DAF), que a la vez generaron microburbujas para la remoción de iones Fe^{+3} , como precipitados, y nano partículas de $Fe(OH)_3$ en aguas residuales. Se obtuvieron resultados superiores al 99% en la separación de los sólidos del agua, siendo esta una de las técnicas más eficaces para remover metales pesados.

Por otro lado, Ryskie et al. (2020) evaluaron la eficiencia del uso de microburbujas de ozono para la eliminación de amoníaco (NH_3) y otros metales de efluentes mineros. Los investigadores obtuvieron resultados no tan favorables, recomendando hacer tratamientos previos al efluente para luego aplicar las microburbujas de ozono para una mejor eliminación de metales.

Dentro de los parámetros de los efluentes también es importante tener en cuenta los niveles de DBO_5 , puesto que estos son contrastados con los niveles de concentración de DQO, es decir, guardan una relación. Investigaciones previas han utilizado la técnica del uso de micro/nanoburbujas para reducir los niveles de DBO_5 . Por ejemplo, Jindo & Morikawa (2020) recalcaron que los parámetros en los humedales de Cascajo superaban las concentraciones óptimas antes de introducir las micro/nanoburbujas. Las causas de la contaminación que afectaron a los humedales fueron más que todo por vertidos de desechos sólidos, el drenaje ácido de las minas de la minería informal de la zona, actividades agrícolas con agroquímicos que eran potencialmente dañinos.

Todos los parámetros evaluados disminuyeron hasta una décima concentración después de 8 meses de haberse aplicado el tratamiento. En cuanto a la tasa de remoción en una semana, la reducción en todos los indicadores evaluados fue más eficiente en la segunda fase, después de 4 meses aplicando el tratamiento, mostrando la reducción en 28.9, 38.7, 15.5 y 5.9%, en DQO, DBO_5 , nitrógeno total (TN) y fósforo total (TP), respectivamente (Ver Tabla 1).

Tabla 1. Desviación media y estándar de los indicadores de la calidad del agua tratada por nanoburbujas.

DÍA	TEMPERATURA (C°)	pH	DQO (mg/l)	DBO ₅ (mg/l)	TN (mg/l)	TP (mg/l)
23/07/2011	17,6 (0,8)	8,9 (0,1)	1295,3 (63,4)	547,8 (4,1)	161,6 (4,0)	10,5 (0,2)
30/07/2011	17,9 (0,6)	8,7 (0,1)	1131,0 (65,3)	535,3 (4,2)	154 (2,1)	9,7 (0,1)
23/11/2011	21,3 (0,5)	7,6 (0,4)	428,4 (38,5)	168,2 (17,7)	89,5 (4,2)	5,1 (0,1)
30/11/2011	21,0 (0,8)	7,6 (0,1)	304,6 (42,5)	103,1 (18,9)	75,6 (4,0)	4,8 (0,1)
23/03/2012	27,3 (1,0)	7,5 (0,0)	70,8 (1,1)	31,7 (0,8)	18,6 (0,7)	2,1 (0,1)
30/03/2012	24,3 (1,0)	7,4 (0,1)	66,1 (1,9)	29,3 (0,5)	16,2 (0,9)	1,9 (0,1)

Fuente: Jindo & Morikawa (2020)

Núñez et al. (2017) trataron aguas residuales de una embotelladora usando nanoburbujas de aire, comparando resultados obtenidos a los 45 y 90 minutos de aplicación. Los resultados demostraron que el tratamiento fue eficiente en la reducción de DBO₅, DQO y Turbidez alcanzando disminuir su concentración en 99, 98 y 80% respectivamente, tal como se muestra en la Tabla 2 y Figura 2.

Tabla 2. Comparación de análisis de muestra

Fecha	Código muestra	Temp. (°C)	pH	C.E. (mS/cm)	Turbidez (NTU)	DBO ₅ (mg/L)	DQO (mg/L)
18/11/2017	M1-0	26	8.5	2410	216	2133	3514
19/11/2017	M1-45	25	8	2270	87.3	1042	1821
19/11/2017	M1-90	26	7.5	2320	64	6.3	102
04/12/2017	M2-0	25	8.5	2500	180.7	2136	3681
04/12/2017	M2-45	25	8	2360	90	1061.4	1803
04/12/2017	M2-90	26	7	2290	51	4.4	32
04/12/2017	M3-0	24	9	2370	152	1592.7	3296
04/12/2017	M3-45	24	8.5	2240	85	784	1618
04/12/2017	M3-90	25	7.5	2180	42.6	<2.0	48.2

Fuente: Núñez et al. (2017)

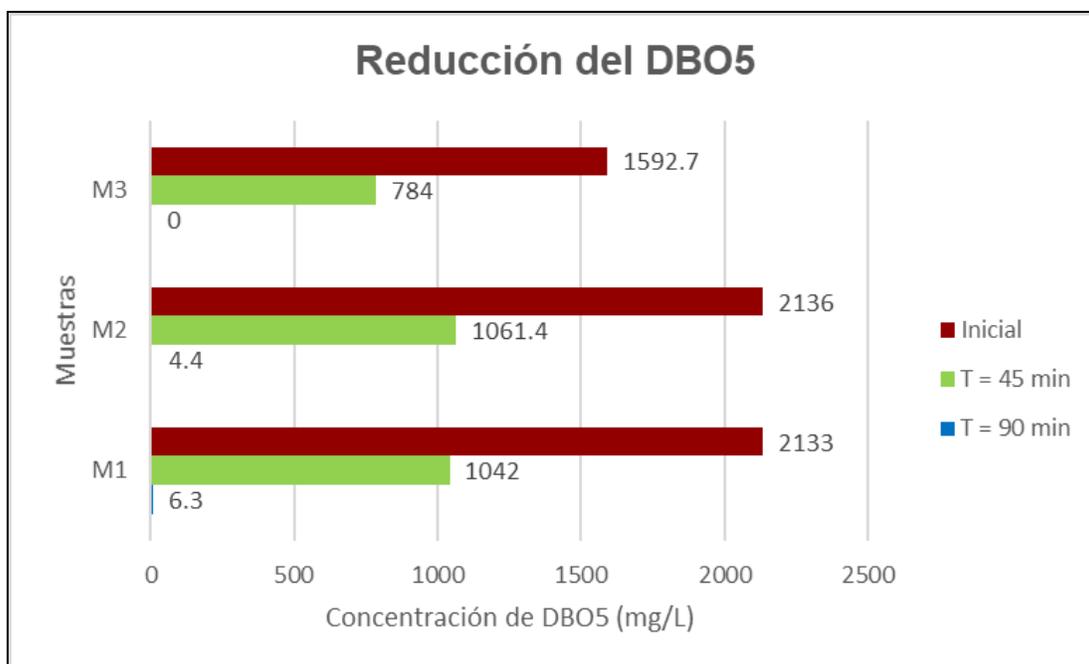


Figura 2. Reducción del DBO₅ (Fuente: Núñez et al., 2017)

Hu & Xia (2017) utilizaron las micro/nanoburbujas de ozono para tratar aguas subterráneas contaminadas con tricloroetileno (TCE), aplicando las MNBs a cinco diferentes pozos eliminándose el 90% del TCE en los primeros cuatro días de aplicación. El que mayor eficiencia tuvo fue el pozo #3, debido a que se encontraba más cerca del pozo de inyección del tratamiento. Los autores concluyeron que las micro/nanoburbujas de ozono son efectivas para el tratamiento de aguas subterráneas con concentraciones relativamente bajas de contaminantes (Tabla 3).

Tabla 3. Concentraciones iniciales y finales de tricloroetileno (TCE) en aguas subterráneas

POZOS	#1	#2	#3	#4	#5
Concentración inicial de TCE (mg/L)	3.529 ± 0,002	4.502 ± 0,005	10.130 ± 0,004	0,264 ± 0,002	2.129 ± 0,004
Concentración final de TCE (mg/L)	0,010 ± 0,004	0,003 ± 0,001	0,018 ± 0,014	0,007 ± 0,002	0,003 ± 0,000

Fuente: Hu & Xia (2017).

Kim et al. (2020) recalcan que la remediación de micro partículas inorgánicas (arcilla y limo) y de plástico dependen de las características físicas de las nanoburbujas como es su tamaño, cantidad, tiempo de formación, densidad y

tamaño de los agregados durante el tratamiento. Los autores realizaron una simulación utilizando un modelo de flotación, para identificar el tamaño de las nanoburbujas como de las micro partículas. Como se observa en la Figura 3, se obtuvo dos tamaños de burbujas, una de 2 μm y otra de 0.7 μm (nanoburbujas).

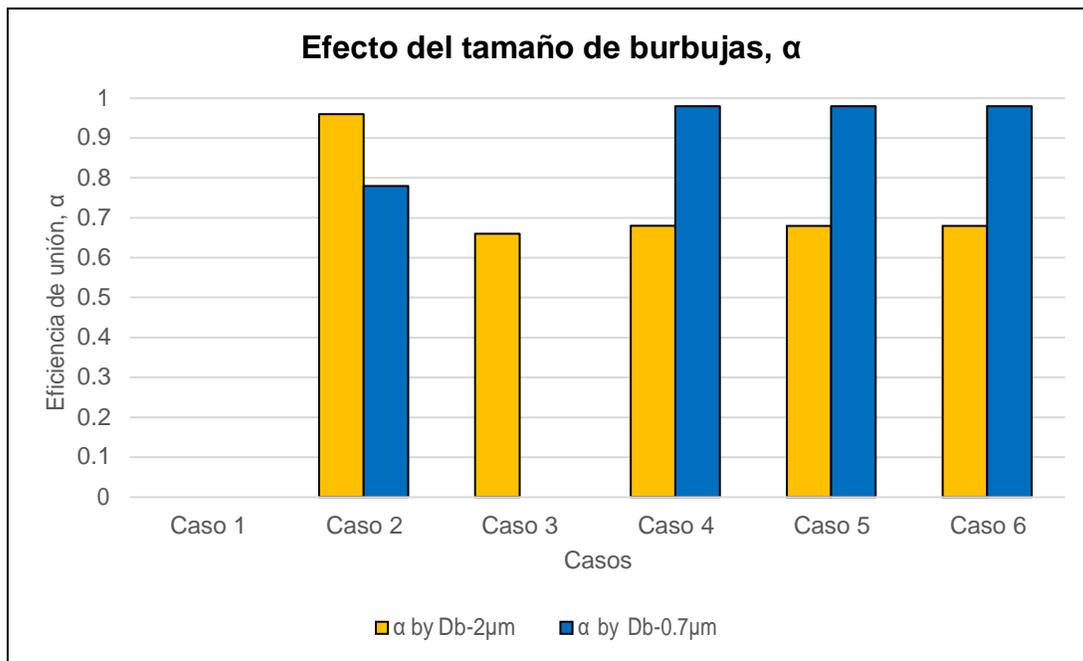


Figura 3. Efecto del tamaño de burbujas de 2 μm y 0.7 μm sobre la eficiencia de la unión en cada caso (Fuente: Kim et al., 2020)

Durante la simulación se inyectaron nanoburbujas de ozono generando algunas microburbujas adicionales, ayudando a alcanzar mejor eficiencia de unión debido al contacto entre las burbujas con las partículas. Las nanoburbujas de 0.7 μm demostraron mayor eficiencia durante el tratamiento alcanzando un 95% en tres de los seis casos, mientras que las microburbujas de 2.0 μm solo alcanzaron el 95% en uno de los seis casos.

Wang et al. (2020) sostuvieron que las nanoburbujas de oxígeno mejoraron significativamente la fotodegradación de la oxitetraciclina en efluentes contaminados a través de la transferencia de masa y la generación de radicales reactivos durante el colapso de las nanoburbujas en el momento de la inyección del tratamiento en el efluente. Además, se confirmó que la estabilidad de las nanoburbujas de oxígeno depende del pH.

Mientras que, Xiao et al. (2018) diseñaron cuatro sistemas para estudiar el impacto de las nanoburbujas en la remoción de fosfina en aguas residuales artificiales. En los resultados obtenidos, las nanoburbujas impidieron la precipitación de partículas de fósforo, pero promovió la flotación de partículas precipitadas. Sin embargo, la adición de nanoburbujas después de la precipitación aumentó la eficiencia de recuperación por flotación hasta en un 90%.

Susanti et al. (2021) utilizaron tratamientos aireados con nanoburbujas en la temperatura del agua de cría y en sus efectos en el consumo de oxígeno de *Penaeus vannamei*, que dio como resultado una temperatura de agua más baja, un consumo de oxígeno y un OD más alto a diferencia con los tratamientos de control y aireación con bomba. Finalmente, la investigación mostró un crecimiento óptimo del camarón, proporcionando información importante para el avance del cultivo.

Wang et al. (2021) utilizaron las nanoburbujas como tratamiento para los cultivos de arroz que tenían excesivos fertilizantes químicos, de esa forma se demostró mejoras en la utilización de nutrientes. Las nanoburbujas promovieron la altura en las plantas y la longitud de sus raíces. En el experimento de campo se comprobó las observaciones de laboratorio, como la mejora de absorción de nutrientes, llegando a un rendimiento del 75%.

Por otro lado, existen muchos investigadores que han recolectado información acerca del tratamiento de micro/nanoburbujas para llegar a conclusiones basadas en revisiones de artículos científicos y reviews, describiendo métodos utilizados por los diversos investigadores, con la finalidad de resumir los resultados sobre la generación y aplicación de micro/nanoburbujas.

Por ejemplo, Khan et al. (2020), en su investigación detallaron acerca del uso de las micro/nanoburbujas, sus propiedades, estabilidad, métodos de generación y sus características físicas y químicas a través de los años. Los autores concluyeron que las micro/nanoburbujas aún no han alcanzado su máximo potencial para el tratamiento de aguas, debido a que aún no son usadas globalmente en las plantas de tratamiento de aguas residuales.

Anasori & Sarmah (2021), en su artículo realizaron un análisis bibliométrico y evaluaron las tendencias de la producción científica global de las microburbujas y nanoburbujas entre los años 2000 a 2020, teniendo como resultado final el crecimiento del número de publicaciones según los años, porque es un tema de gran importancia y más desde un punto de vista ambiental.

Nghia et al. (2021), en su estudio de control de *Vibrio Parahaemolyticus* (cepa AHPND), utilizaron las nanoburbujas para la mejora de la calidad del agua. Los investigadores realizaron experimentos aplicando nanoburbujas de aire en bajas dosis, y al mismo tiempo las nanoburbujas de ozono. Como resultado, se obtuvo que ambos experimentos aumentaron significativamente el potencial de reducción de oxígeno y mejoraron la producción del cultivo para el control de *Vibrio Parahaemolyticus*.

III. METODOLOGÍA

3.1. Tipo y diseño de investigación

El enfoque de la investigación fue de tipo cuantitativo ya que se utilizó la recolección y el análisis de base de datos para determinar la eficiencia del uso de micro/nanoburbujas en el tratamiento de efluentes contaminados y probar las hipótesis establecidas previamente (Vega et al., 2014).

La investigación fue de tipo aplicada debido a que su finalidad fue crear nuevos conocimientos que mejoren la calidad de vida de la población, los procesos productivos de las empresas o entidades de prestación de servicios públicos y privados respecto al uso de micro/nanoburbujas en el tratamiento de efluentes contaminados (Rus Arias, 2020). De igual manera, este tipo de investigación se realizó sin terminaciones prácticas y tiene como finalidad recolectar, sintetizar e interpretar información para explicar diferentes fenómenos (Muntané, 2010).

El diseño fue no experimental bibliográfico o documental porque se centra en una revisión sistemática, rígida y profunda del material documental de cualquier clase (Palella & Martins, 2010).

El nivel fue descriptivo, dado que se determinó el porqué de la eficiencia del uso de micro/nanoburbujas como tratamiento de los efluentes contaminados. La investigación descriptiva tiene el objetivo de explicar el comportamiento de una variable en función de otra (Marroquín, 2012).

3.2. Variables y operacionalización

Referente al tema de investigación, se estableció una variable independiente y una dependiente. La variable independiente: el uso de micro/nanoburbujas, y como variable dependiente: el tratamiento de efluentes contaminados. En el Anexo 1 se observa la matriz de operacionalización de variables de la presente investigación.

3.3. Población, muestra y muestreo

La población estuvo establecida por los 193 artículos potenciales que hicieron uso de micro/nanoburbujas como técnica para el tratamiento de efluentes contaminados encontrados en diferentes bases de datos, principalmente los publicados en “Scopus” y “Web of Science”.

La muestra en la presente investigación correspondió a todos los estudios importantes que cumplieron con todos los criterios de integración para más adelante ser analizados de forma meticulosa con las técnicas e instrumentos de recolección de datos, que cumplieran los criterios de inclusión.

El tipo de muestreo fue aleatorio simple porque se realizó una revisión profunda que permitió observar con claridad y detalladamente todos los estudios seleccionados posterior a la filtración, a través de procedimientos estadísticos (valoración del tamaño del efecto y el control sesgo de publicación) (Botella & Zamora, 2017). De acuerdo con Otzen & Manterola (2017), la función básica del muestreo es delimitar qué parte de una población debe analizarse, con la finalidad de hacer inferencias sobre dicha población.

La unidad de análisis fue representada por cada artículo seleccionado relacionado al uso de micro/nanoburbujas para el tratamiento de efluentes contaminados que cumplan los criterios de integración. La unidad de análisis es la entidad más representativa que se toma como objeto específico de estudio, que sirve de base para una investigación (Durán, 2015).

3.4. Técnicas e instrumentos de recolección de datos

Se aplicó la técnica de análisis documental, la cual consiste en recopilar, seleccionar, evaluar y resumir la información necesaria para responder de manera objetiva las interrogantes planteadas inicialmente (Cuellar et al., 2018). Posteriormente se realizó el metaanálisis, para analizar la base de datos obtenidas, con el objetivo de aceptar o rechazar la hipótesis general.

Para la recolección de datos se elaboraron tablas como fichas de registro para adjuntar los datos relevantes para realizar el metaanálisis. En la Tabla 4 se describen los instrumentos de recolección de datos elaborados.

Tabla 4. Técnicas e instrumentos de recolección de datos

Técnicas de recolección de datos	Instrumentos de recolección de datos
Análisis documental	Ficha 01: Ficha de síntesis, recolección y selección de estudio para revisión sistemática y metaanálisis
	Ficha 02: Ficha de síntesis y recolección de datos específicos de los estudios seleccionados
	Ficha 03: Ficha de parámetros previa y posterior a la aplicación de la técnica de micro/nanoburbujas en los estudios seleccionados.

3.4.1. Validez y confiabilidad de los instrumentos

Es fundamental durante la investigación que todos los instrumentos, datos, teorías y procedimientos sean evaluados por expertos que otorguen un carácter de validez expresado en un porcentaje (Hernández, 2010). Los tres instrumentos elaborados fueron sometidos a un juicio de expertos (ver Anexo 2).

La validez de los instrumentos se corroboró mediante un juicio de expertos (ver Anexo 3), los cuales evaluaron de manera independiente la relevancia y congruencia del contenido teórico, la relación con los objetivos planteados y reflejados en cada una de las fichas de recolección de datos. En la Tabla 5 se puede contemplar quienes fueron los especialistas.

Tabla 5. Especialistas que validaron los instrumentos

#	Nombre completo del experto	Grado	CIP	Valoración		
				F1	F2	F3
1	Juan Julio Ordoñez Gálvez	Doctor en Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible	CIP N° 89972	90%	90%	85%
2	Rubén Víctor Munive Cerrón	Doctoris Philosophiae en Ingeniería y Ciencias Ambientales	CIP N°38103	90%	90%	85%
3	Ahuber Omar Vasquez Aranda	Maestro en Gestión Ambiental	CIP N°92507	90%	90%	85%
Promedio de valoración por instrumento				90%	90%	85%
Promedio de valoración total de todos los instrumentos				88.33%		

Leyenda: **F1: Ficha 01**, Ficha de síntesis, recolección y selección de estudio para revisión sistemática y metaanálisis; **F2: Ficha 2**, Ficha de síntesis y recolección de datos específicos de los estudios seleccionados y **F3: Ficha 3**, Ficha de parámetros previa y posterior a la aplicación de la técnica de micro/nanoburbujas en los estudios seleccionados.

3.5. Procedimientos

La presente investigación usó la revisión sistemática para recopilar e integrar de forma objetiva los resultados obtenidos de diversos artículos científicos, provenientes de bases de datos científicas, sobre la eficiencia de la aplicación de las micro/nanoburbujas como técnica de tratamiento de efluentes contaminados.

Para la construcción de la investigación se realizó las actividades establecidas en el diagrama de flujo mostrado en la Figura 4.

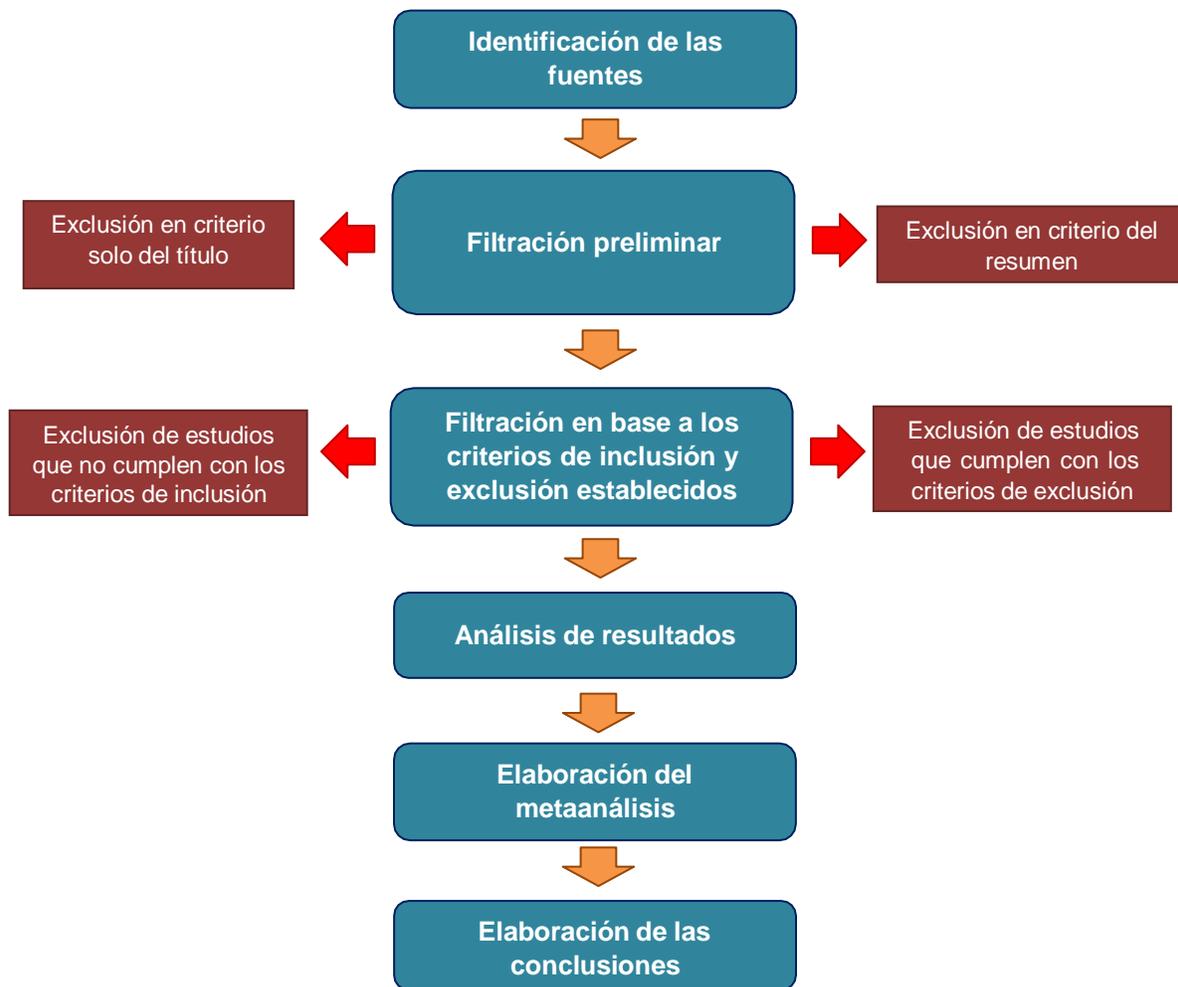


Figura 4. Flujograma de las etapas para la realización de la revisión sistemática y metaanálisis

3.5.1. Identificación de las fuentes

Las revisiones sistemáticas necesitan una base inicial amplia con muchos estudios, provenientes de base de datos como Scopus y Web of Science, para facilitar la búsqueda de los artículos científicos, se debe tener estrategias de búsqueda suficientemente consistentes para encontrar los artículos científicos más relevantes. En la Tabla 6 se puede contemplar las estrategias de búsqueda que se usaron durante el desarrollo del proyecto de investigación.

Tabla 6. Estrategias de búsqueda de literatura

Base de datos	Cadena de búsqueda
Scopus	<i>((nano AND bubble OR nanobubble OR nano-bubble) AND (water OR wastewater OR waste AND water) AND treatment AND NOT plastic AND NOT (particle OR nanoparticle) AND NOT cancer)</i>
Web of Science	

3.5.2. Filtración preliminar

Esta filtración preliminar consistió en reducir la base total que se tiene bajo características simples y a primera vista, siguiendo el siguiente orden:

- **Exclusión de criterios por el título:** Leyendo los títulos de todos los estudios dentro de la base de datos, se excluyó cada artículo que no represente la suficiente relevancia para el presente proyecto de investigación.
- **Exclusión de criterios por el resumen:** Después de las dos primeras filtraciones preliminares, se leyó todos los resúmenes de los estudios restantes, excluyendo todo aquel que no represente la suficiente relevancia en el tema del uso de micro/nanoburbujas para el tratamiento de efluentes contaminados.

3.5.3. Filtración en base a los criterios de inclusión y exclusión establecidos

Esta filtración se basó en reducir la base total que se obtuvo bajo la evaluación de las siguientes condiciones de inclusión:

- Publicados desde enero del 2011 hasta noviembre del 2021, para tener datos actualizados (máximo 10 años de antigüedad).
- Que presenten datos recolectados de estudios previos en relación con el uso de micro/nanoburbujas para el tratamiento de efluentes contaminados.
- Que solo presenten la única tecnología de tratamiento con micro o nanoburbujas o la combinación de ambos tratamientos.

- Que no presenten tecnologías de macroburbujas o burbujas con diámetros mayores a 100 μm .
- Que la tecnología sea aplicada en el campo ambiental.

3.5.4. Análisis de resultados

Esta etapa se desarrolló usando las fichas de recolección de datos 2 y 3 (Ver Anexo 2), puesto que, obteniendo los parámetros que coinciden entre varios estudios se pudo realizar la comparación de parámetros de DQO y DBO₅ en el metaanálisis.

3.5.5. Elaboración del metaanálisis

Con todos los datos recolectados en las fichas y teniendo la base de datos filtrada, se pudo realizar el metaanálisis, el cual se constituye a través del software de revisión y análisis de datos Review Manager (RevMan), para posteriormente interpretar los resultados obtenidos. Es importante recalcar que el metaanálisis implica una síntesis cuantitativa de la evidencia acumulada sobre una pregunta de investigación previamente definida. La respuesta se basó en la información contenida en los estudios previamente publicados (estudios primarios) (Botella & Zamora, 2017).

3.5.6. Elaboración de las conclusiones

Al haber realizado la revisión sistemática y el metaanálisis, se procedió a elaborar las conclusiones con los aspectos más relevantes de los resultados obtenidos, asimismo, se acepta o rechaza la hipótesis planteada inicialmente.

3.6. Método de análisis de datos

Para analizar los datos recolectados, se hizo mediante las fichas de registro presentadas anteriormente, así como también haciendo uso del software Review Manager (RevMan), este programa estadístico es utilizado para revisiones sistemáticas y ayuda a realizar diferentes tipos de metaanálisis.

3.7. Aspectos éticos

El presente proyecto de investigación estuvo basado en los principios de ética, respetando la propiedad intelectual. Se presentaron datos reales que se comprobaron utilizando el método científico. Además, se respetó el código de ética en investigación de la Universidad Cesar Vallejo (Resolución de consejo universitario N° 0126-2017/UCV), debido a que no existió plagio alguno de otra información, sustentado a través del software de detección de similitud Turnitin.

Asimismo, la investigación se cumplió con las líneas de investigación de las carreras profesionales de pregrado y posgrado (Resolución de consejo universitario N° 02200-2018/UCV) y la guía de productos observables 2020. También, se tuvo en cuenta que la información recopilada esté debidamente citada y parafraseada mediante la norma International Organization for Standardization (ISO 690), con la finalidad de respetar la propiedad intelectual de los autores y el reglamento de investigación de la Universidad César Vallejo.

IV. RESULTADOS

En el siguiente flujograma se representa el proceso de obtención de los artículos seleccionados para el metaanálisis (Ver Figura 5).

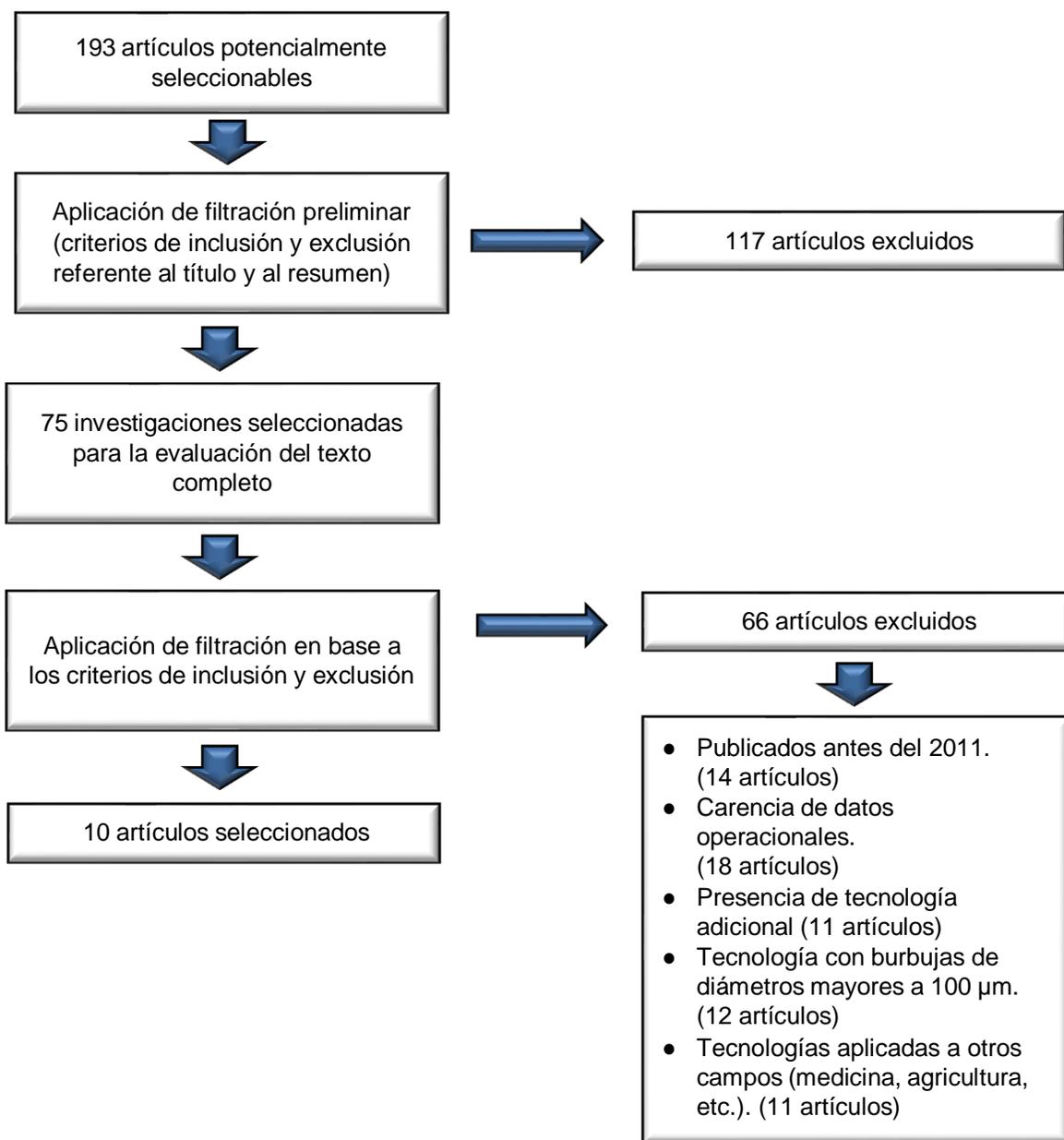


Figura 5. Flujograma de los procesos de obtención de los artículos seleccionados para el metaanálisis

Los artículos potencialmente destacados se obtuvieron de las bases de datos de mayor calidad científica como Scopus y Web of Science, a través de cadenas de búsqueda se adquirió un total de 193 artículos.

Todos los artículos fueron evaluados mediante criterios de exclusión utilizando el software Mendeley Reference Manager, aplicando la filtración preliminar basada en el título y resúmenes de cada artículo, así como también, el descarte de los artículos duplicados encontrados en las bases de datos. En total se excluyeron 117 artículos, los cuales fueron retirados de la base de datos.

Luego de haber aplicado los criterios de exclusión, los 75 artículos restantes fueron evaluados a texto completo, a través de los criterios de inclusión. Después, se obtuvo 57 artículos excluidos, los factores que determinaron su exclusión fueron publicados antes del 2011 (14 artículos), carencia de datos operacionales (18 artículos), presencia de tecnología adicional (11 artículos), tecnología de macroburbujas o de diámetros mayores a 100 μm (12 artículos) y tecnologías aplicadas a otros campos (medicina, agricultura, etc.) (11 artículos).

Adicionalmente, se aplicaron criterios de inclusión usando la escala de Newcastle – Ottawa, para asegurar que dichos artículos cuentan con menor cantidad de sesgos científicos. Finalmente, los resultados que se obtuvieron al final fueron de 10 artículos seleccionados para proceder con la aplicación del metaanálisis.

Tabla 7. Síntesis, recolección y selección de estudio para revisión sistemática y metaanálisis

Nro.	Autor y año	Título	Objetivo	Técnica o metodología	Revista	Hallazgos
1	Cruz et al. (2017)	<i>Reduction of Coliforms presents in domestic residual waters by Air-Ozone Micro-Nanobubbles in Carhuaz city, Perú.</i>	<ul style="list-style-type: none"> Recolectar y analizar muestras de aguas residuales domesticas Tratar las aguas residuales domesticas mediante la aplicación de micronanoburbujas aire-ozono 	<ul style="list-style-type: none"> Se recolectó y analizó muestras de aguas residuales domesticas Se trató las aguas residuales domesticas mediante la aplicación de nanoburbujas aire-ozono. Se realizó un análisis final de la muestra tratada en el laboratorio. Se realizó la eficacia del tratamiento 	Journal of Nanotechnology	<ul style="list-style-type: none"> Hay reducciones de coliformes fecales y totales presentes en las aguas residuales domesticas. La mejor reducción de tratamiento en la eficiencia de coliformes fecales y totales en aguas residuales domesticas fue en T3 por aplicando micronanoburbujas de aire-ozono. Se obtuvo 99.58% para coliformes fecales y 99.01% para coliformes totales.
2	Etchepare et al. (2017)	<i>Removal of ferric hydroxide by flotation with micro and nanobubbles</i>	<ul style="list-style-type: none"> Presentar resultados de la remoción de Fe³⁺ así como nano partículas de Fe(OH)₃ con nanoburbujas a través de una flotación por aire disuelto. Estudiar la flotación de nanopartículas contaminantes a través del uso de nanoburbujas. 	<ul style="list-style-type: none"> Se hicieron tres pruebas: dos con diferentes presiones cada muestra con nanoburbujas y microburbujas, una de 2 bar, otra de 4 bar y una de manera aislada solo con las nanoburbujas a una presión de 2.5 bar. Se estudiaría la remoción de Fe³⁺ y Fe(OH)₃ de las muestras a evaluar. 	<i>Separation and Purification Technology</i>	<ul style="list-style-type: none"> La remoción de Fe³⁺ realizada por precipitación y flotación a través de nanoburbujas es efectiva. El Fe(OH)₃ es precipitado a un pH de 7 en forma coloidal, agregados largos y nanopartículas. La experimentación aislada con solo nanoburbujas logro remover nanopartículas de Fe(OH)₃ precipitadas. Se obtuvo mejores resultados a una presión de 2 bar. La eficiencia de remoción de hierro fue de 99%, pasando de 30 mg/L a 0.3 mg/L y la turbidez disminuyo en un 95%. Se cree que la combinación de las micro y nanoburbujas tienen un gran potencial para futuras separaciones de partículas, incluyendo nanopartículas. Lo que ayudara a remover contaminantes específicos del agua o efluentes.
3	Hu & Xia (2017)	<i>Application of ozone micro-nano-bubbles remediation to groundwater</i>	<ul style="list-style-type: none"> Investigar la eficiencia de la aplicación de micro-nano-burbujas (MNanoburbujas) de ozono en el tratamiento de aguas subterráneas. Examinar las características de las MNanoburbujas de ozono adecuadas para el tratamiento de aguas subterráneas, Comprobar resultados al tratar agua contaminada por compuestos orgánicos con ozonización a través de MNanoburbujas. 	<ul style="list-style-type: none"> Las características fisicoquímicas (tamaño de distribución y potencial zeta) de las MNanoburbujas de ozono fueron estudiadas de manera experimental y a través de modelos de pruebas. La eficiencia de la remediación de agua contaminada y agua subterránea fue examinada bajo condiciones de laboratorio usando tricloroetileno (TCE) como un contaminante orgánico representativo. 	<i>Journal of Hazardous Materials</i>	<ul style="list-style-type: none"> Las nanoburbujas de ozono son estables en aguas subterráneas soportando incluso condiciones altamente salinas. Durante la experimentación se observó que cuando la concentración de TCE era más bajo que 0.01 mg/L, el índice de degradación también bajo, por lo tanto, se puede asumir que la baja concentración de contaminantes orgánicos fue la razón principal para la limitada eficiencia de remediación. Las MNB de ozono representan una tecnología innovadora para la remediación in situ de aguas subterráneas contaminadas principalmente por sustancias orgánicas.
4	Menendez et al. (2017)	<i>Reduction of hospital wastewater through micro-nano ozone-air bubbles</i>	<ul style="list-style-type: none"> Reducir la concentración de materia orgánica de las aguas residuales hospitalarias expresadas en DBO₅ y COD 	<ul style="list-style-type: none"> Se recolectó 40 litros de aguas residuales hospitalarias para el análisis inicial. Se consideraron 4 etapas: recogida y análisis inicial de la muestra de agua residual, tratamiento con MNB de ozono-aire, análisis después del tratamiento y eficiencia del tratamiento sobre los parámetros. 	<i>Journal of Nanotechnology</i>	<ul style="list-style-type: none"> Las concentraciones iniciales de los parámetros de campo del agua residual en la muestra 1 como: CE (743 µS / cm) y Turbidez (44,9 NTU) aplicando micronanoburbujas de ozono-aire en 15 minutos disminuyeron su concentración. Las concentraciones iniciales de los parámetros físico-químicos del agua residual en la muestra 1 como: DBO₅ (132 mg / L), DQO (374 mg / L) y TSS (43 mg / L) aplicando micronanoburbujas de ozono-aire en 15 minutos disminuyeron su concentración.
5	Ventura et al. (2017)	<i>Treatment of sanguaza from Ancon market using air micro-nanobubblesat laboratory scale</i>	<ul style="list-style-type: none"> Reducir las concentraciones de los parámetros físicos y químicos de las aguas de Sanguaza, provenientes de los puestos de pescado que se encuentran en el mercado de Ancón 	<ul style="list-style-type: none"> Se recogió sanguaza de pescado en dos puestos del mercado de Ancón, se extrajo un total de 20 ltrs. de agua de sanguaza. Se utilizó el generador de nanoburbujas para el tratamiento. Se analizaron los parámetros físicos y químicos de las aguas de sanguaza. 	<i>Journal of Nanotechnology</i>	<ul style="list-style-type: none"> La nanotecnología es una técnica muy útil para el tratamiento de aguas contaminadas de origen doméstico, mejorando así los parámetros físicos y químicos de las aguas de sanguaza. Se realizaron 2 muestras con 5 repeticiones para los parámetros físicos y químicos. Sanguaza tratada aplicando nanoburbujas de aire en tres tiempos, logró una turbidez promedio de 81.5 NTU, DBO₅ promedio de 134 mg / L y DQO de 150,43 mg / L. La eficiencia del tratamiento a los 60 minutos alcanzó una turbidez promedio del 79,61%, DBO₅ de 69,65% y DQO del 69,24%. En consecuencia, es posible asegurar la eficiencia de los parámetros físicos y químicos.

Nro.	Autor y año	Título	Objetivo	Técnica o metodología	Revista	Hallazgos
6	Valenzuela et al. (2018)	<i>Reduction of Lead and Silicon in Wastewater from Gas Scrubbing of a Company using Micronanobubbles of AirOzone</i>	<ul style="list-style-type: none"> Reducir la concentración de plomo y silicio mediante la aplicación de micronanoburbujas de aire y ozono en las aguas residuales de depuración de gases de una empresa 	<ul style="list-style-type: none"> Se recogió una muestra de 40 L de agua de lavado de gases. Se realizó el análisis inicial de la muestra Se realizó el tratamiento del agua mediante el uso de micronanoburbujas de aire-ozono. Se hizo el cálculo de la eficiencia en la reducción de Plomo y Silicio. 	<i>Chemical Engineering Transactions</i>	<ul style="list-style-type: none"> Al utilizar las micronanoburbujas aire-ozono, en un sistema continuo y por diferentes tiempos de 8,16 y 24 minutos se ha comprobado que las concentraciones de Plomo y Silicio se han reducido en cada tiempo y por los diferentes pH (6, 8 y 10), así como las características físicas. El agua residual del agua de lavado de gases de la empresa excede los Estándares de Calidad Ambiental, teniendo el parámetro Plomo y Silicio. La concentración final de Plomo y Silicio, luego de la aplicación de micronanoburbujas aire-ozono a un pH igual a 8 logró un porcentaje de remoción del 99.7%. En el caso del silicio a pH igual a 10, se consiguió un porcentaje de eliminación del 81,6%.
7	Núñez et al. (2019)	<i>Application of air nanobubbles in washing sewage of a Soft drink bottling plant</i>	<ul style="list-style-type: none"> La investigación busca aplicar la técnica de nanoburbujas de aire en aguas residuales de lavado de una Embotelladora de Bebidas Carbonatadas 	<ul style="list-style-type: none"> Se extrajo 1600 mL. del tanque de recolección de aguas residuales previo a la aplicación de las nanoburbujas de aire. Se evaluó en dos etapas de 45 min. Y 90 min., para determinar la reducción de los parámetros. La muestra se ingresó al generador de nanoburbujas. Las concentraciones finales de los parámetros se analizaron después del tratamiento. 	<i>Journal of Nanotechnology</i>	<ul style="list-style-type: none"> La aplicación de nanoburbujas de aire permite la reducción de los parámetros de pH, conductividad, turbidez, DBO5 y DQO. Los parámetros físicos redujeron su porcentaje de conductividad eléctrica en la muestra M2-90. Los parámetros químicos se redujeron significativamente.
8	Rameshkumar et al. (2019)	<i>Generation and characterization of nanobubbles by ionization method for wastewater treatment</i>	<ul style="list-style-type: none"> La investigación experimental busca examinar la influencia de nanoburbujas en los efluentes contaminados o su tratamiento. Generar nanoburbujas en 4 diferentes muestras de efluentes para probar el mejoramiento de la calidad del agua después del uso de la técnica. 	<ul style="list-style-type: none"> Cuatro casos de estudio que verificaron la eficiencia de nanoburbujas en el tratamiento de efluentes contaminados fueron investigados: (01) tratamiento de agua potable, (02) tratamiento de agua de estanques, (03) tratamiento de efluentes domésticos y (04) tratamiento de efluentes industriales. La generación de nanoburbujas se hizo por un método de ionización y se logró medir el tamaño de estas a través de un microscopio de fuerza atómica. 	<i>Desalination and Water Treatment</i>	<ul style="list-style-type: none"> El diámetro de las nanoburbujas estuvo oscilando entre 100 y 800 nm. Las nanoburbujas son generadas rápidamente en agua con altos niveles de salinidad comparadas con las que no, esto debido a la alta conducción eléctrica de aguas salinas. Se demostró que las nanoburbujas reducen significativamente el total de sólidos suspendidos, la demanda química de oxígeno, la demanda bioquímica de oxígeno, entre otros parámetros durante la experimentación. Agua con nanoburbujas puede ser usada en el tratamiento de efluentes debido a su capacidad de producir radicales libres receptivos, que son de suma importancia durante la degradación de materia orgánica y otros contaminantes.
9	Kim et al. (2020)	<i>Effect of nanobubbles for improvement of water quality in freshwater: Flotation model simulation</i>	<ul style="list-style-type: none"> Remover micro y nano partículas hidrofóbicas de efluentes usando nanoburbujas como técnica para realizar la flotación. 	<ul style="list-style-type: none"> Se realizó simulaciones usando un modelo de flotación para tratar un efluente sintético con concentraciones altas de partículas hidrofóbicas. Las nanopartículas representan metales pesados como lo que es el fósforo. 	<i>Separation and purification technology</i>	<ul style="list-style-type: none"> El estudio examino y confirmo que el efecto de la remediación de aguas usando nanoburbujas depende del tamaño y cantidad de burbujas.
10	Sun et al. (2021)	<i>Optimization of iron removal in water by nanobubbles using response surface methodology</i>	<ul style="list-style-type: none"> Desarrollar una técnica en el uso de nanoburbujas para remover hierro (Fe2+) de efluentes contaminados. Investigar la oxidación de Fe2+ en el agua y examinar la influencia de las concentraciones iniciales de hierro, pH y presión de aireación en la eficiencia del tratamiento al usar nanoburbujas. 	<ul style="list-style-type: none"> Se evaluó las concentraciones de Fe2+, pH, temperatura y presión de aireación de un efluente contaminado, antes y después del tratamiento. El efluente sería una solución de Fe2+ preparada usando sulfato férrico producido en una fábrica de reactivos químicos. Durante la generación de las nanoburbujas se tomó tres muestras, una por cada 30 minutos para determinar la concentración de Fe2+. 	<i>Water Science and Technology: Water Supply</i>	<ul style="list-style-type: none"> El diámetro promedio de las nanoburbujas durante la experimentación fue de 100 nm. La reducción del Fe2+ usando nanoburbujas fue muy dependiente en el pH, demostrando la mayor eficiencia de oxidación de hierro en las muestras con 9 de Ph y a 250 kPa. Cuando la presión aumenta, el tamaño de las burbujas generadas disminuye, su superficie específica mejora, la concentración de oxígeno aumenta, lo que favorece a la oxidación del Fe2+. Las nanoburbujas pueden ser usadas para degradar contaminantes y metales pesados, además puede usarse para purificar el agua.

En la Tabla 7 se presentaron los artículos que lograron reunir todos los criterios de inclusión para su evaluación a texto completo, resaltando los objetivos, la metodología o técnica realizada, los resultados y hallazgos más importantes de cada una de ellas.

La presente revisión sistemática evaluó de manera minuciosa, diez artículos publicados entre inicios de 2017 y septiembre de 2021, de las cuales cuatro fueron las publicadas en el 2017, dos publicadas en el 2018, dos publicadas en el 2019 y una en el 2021.

En todas las investigaciones se obtuvieron resultados positivos respecto al tratamiento de aguas a través del uso de micro/nanoburbujas, logrando disminuir significativamente metales, componentes orgánicos, demanda bioquímica y química de oxígeno, entre otros parámetros.

Tabla 8. Síntesis y recolección de efluentes y parámetros específicos de los estudios seleccionados

Nro.	Autor y año	Título	Ámbito geográfico	Características de NB evaluadas	Efluente tratado	Contaminante principal	Parámetros evaluados
1	Cruz et al. (2017)	<i>Reduction of Coliforms presents in domestic residual waters by Air-Ozone Micro-Nanobubbles in Carhuaz city, Perú.</i>	Perú	<ul style="list-style-type: none"> Tamaño o diámetro de las nanoburbujas. Presión interna. 	Aguas residuales domesticas	<ul style="list-style-type: none"> Coliformes totales Coliformes termotolerantes (fecales) 	<ul style="list-style-type: none"> Temperatura Turbidez Conductividad eléctrica pH SST DBO₅ DQO OD Coliformes fecales y totales
2	Etchepare et al. (2017)	<i>Removal of ferric hydroxide by flotation with micro and nanobubbles</i>	Brasil	<ul style="list-style-type: none"> Tamaño o diámetro de las nanoburbujas. Distribución de las nanoburbujas 	Efluente sintético contaminado con hierro	<ul style="list-style-type: none"> Hidróxidos metálicos Hidróxidos férricos 	<ul style="list-style-type: none"> Turbidez Concentración inicial Concentración final
3	Hu & Xia (2017)	<i>Application of ozone micro-nano-bubbles remediation to groundwater</i>	China	<ul style="list-style-type: none"> Tamaño o diámetro de las nanoburbujas. Potencial Z Transferencia de masa Distribución de las nanoburbujas 	Aguas subterráneas contaminadas con tricloroetileno	<ul style="list-style-type: none"> Tricloroetileno 	<ul style="list-style-type: none"> Salinidad Tricloroetileno Naranja de metilo
4	Menendez et al. (2017)	<i>Reduction of hospital wastewater through micro-nano ozone-air bubbles</i>	Perú	<ul style="list-style-type: none"> Presión interna Velocidad de ascenso Tamaño o diámetro de las nanoburbujas. Tiempo de contacto 	Aguas residuales hospitalarias	<ul style="list-style-type: none"> Materia orgánica Mezcla de medicamentos Soluciones desinfectantes Secreciones de pacientes 	<ul style="list-style-type: none"> Temperatura pH Conductividad eléctrica Turbidez TSS DQO DBO₅
5	Ventura et al. (2017)	<i>Treatment of sanguaza from Ancon market using air micro-nanobubblesat laboratory scale</i>	Perú	<ul style="list-style-type: none"> Tamaño o diámetro de las nanoburbujas. Presión interna Concentración de las Nanoburbujas 	Aguas residuales domésticas	<ul style="list-style-type: none"> Sanguaza 	<ul style="list-style-type: none"> Temperatura pH Turbidez DQO DBO₅

Nro.	Autor y año	Título	Ámbito geográfico	Características de NB evaluadas	Efluente tratado	Contaminante principal	Parámetros evaluados
6	Valenzuela et al. (2018)	<i>Reduction of Lead and Silicon in Wastewater from Gas Scrubbing of a Company using Micronanobubbles of AirOzone</i>	Perú	<ul style="list-style-type: none"> • Tiempo de contacto • Tamaño o diámetro de las nanoburbujas. • Presión interna • Velocidad de ascenso 	Aguas residuales de una compañía de gas	<ul style="list-style-type: none"> • Agua de lavado de gases 	<ul style="list-style-type: none"> • Turbidez • Conductividad eléctrica • Oxígeno disuelto • pH • Temperatura • Concentración de Plomo • Concentración de Silicio
7	Núñez et al. (2019)	<i>Application of air nanobubbles in washing sewage of a Soft drink bottling plant</i>	Perú	<ul style="list-style-type: none"> • Tamaño o diámetros de las nanoburbujas • Presión interna • Tiempo 	Efluente industrial de lavado	<ul style="list-style-type: none"> • Conductividad eléctrica • pH • Turbidez • DBO₅ 	<ul style="list-style-type: none"> • Conductividad eléctrica • pH • Turbidez • DBO₅
8	Rameshkumar et al. (2019)	<i>Generation and characterization of nanobubbles by ionization method for wastewater treatment</i>	India	<ul style="list-style-type: none"> • Tamaño o diámetro de las nanoburbujas. • Presión interna 	Aguas residuales de agua de tubería, agua estanques, efluentes domésticos e industriales.	<ul style="list-style-type: none"> • Fosfato 	<ul style="list-style-type: none"> • DQO • DBO₅ • OD • SST • SDT • Nitrato • Fosfato
9	Kim et al. (2020)	<i>Effect of nanobubbles for improvement of water quality in freshwater: Flotation model simulation</i>	Korea	<ul style="list-style-type: none"> • Tamaño de burbujas • Tiempo • Concentración 	Efluente sintético con agregado de nanopartículas hidrofóbicas	<ul style="list-style-type: none"> • Turbidez 	<ul style="list-style-type: none"> • OD • pH • Temperatura • OD
10	Sun et al. (2021)	<i>Optimization of iron removal in water by nanobubbles using response surface methodology</i>	China	<ul style="list-style-type: none"> • Presión interna • Tamaño o diámetro de las nanoburbujas. 	Soluciones acuosas	<ul style="list-style-type: none"> • Hierro 	<ul style="list-style-type: none"> • Concentración • pH • Presión de aireación

En la Tabla 8 se presentó la síntesis y recolección de datos específicos de los diez artículos que lograron reunir todos los criterios de inclusión para su evaluación a texto completo, resaltando: el ámbito geográfico de la investigación, las características de la nanoburbujas usadas en cada investigación, el efluente que se trató, el contaminante que fue más relevante para el estudio y parámetros adicionales evaluados durante la experimentación.

Los nueve artículos seleccionados presentaron diferentes ámbitos geográficos, uno de ellos es precedente de la India, otro proveniente de Brasil, tres de ellos de China y cuatro artículos de Perú. Todos los autores midieron el tamaño de las micro/nanoburbujas, 6 de ellos contaron la presión interna a la que se encuentran durante el tratamiento y 4 de ellos la concentración de las mismas durante el tratamiento.

Casi todos los efluentes que fueron tratados eran aguas residuales, a excepción de un par de artículos que realizaron el tratamiento en soluciones acuosas y aguas subterráneas, respectivamente. Destacando en general los efluentes industriales que fueron tratados en seis de los artículos.

El contaminante principal varía en todos los artículos, parámetros tanto físicos, químicos, microbiológicos, orgánicos e inorgánicos estuvieron presentes en toda la base de datos final. En general se reportó concentraciones de potencial de hidrógeno (pH), turbidez, oxígeno disuelto (OD), demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅), demanda química de oxígeno (DQO), temperatura, entre otros.

Tabla 9. Parámetros previa y posterior a la aplicación de la técnica de micro/nanoburbujas en los estudios seleccionados

N°	Autor	Micro / nanoburbujas			Efluente contaminado																																			
		Diámetro (µm)	Presión (atm)	Tiempo (minutos)	Tipo	Muestras		Parámetros evaluados																																
						Cantidad de muestras	Indicador de diferencia		Físicos - químicos												Inorgánicos				Orgánicos		Microbiológicos													
							Indicador	Descripción	C.E. (µs/cm)		DBOs (mg/L)		DQO (mg/L)		Oxígeno disuelto (mg/L)		pH (mg/L)		Turbidez (UNT)		Temperatura (°C)		SST (mg/L)		Fe (mg/L)		Pb (mg/L)		Si (mg/L)		TCE (mg/L)		Coliformes totales (NMP/100 ml)		Coliformes termotolerantes (NMP/100 ml)					
A.T.	D.T.	A.T.	D.T.	A.T.	D.T.	A.T.	D.T.	A.T.	D.T.	A.T.	D.T.	A.T.	D.T.	A.T.	D.T.	A.T.	D.T.	A.T.	D.T.	A.T.	D.T.	A.T.	D.T.	A.T.	D.T.	A.T.	D.T.	A.T.	D.T.	A.T.	D.T.									
1	Cruz et al. (2017)	7	6.12	-	Efluente doméstico	3	Proporción de volumen de efluente sobre agua con mnbs	750 ml/250 ml	288	603	342	20	704	200	3.66	5.33	7.17	6.8	128	55.6	15	24.9	246	89	-	-	-	-	-	-	-	-	240000	4500	130000	1000				
								500 ml/500 ml	288	761	342	15	704	100	3.66	7.21	7.17	7.32	128	44.6	15	25.3	246	51	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	240000	2500	130000	500		
								250 ml/750 ml	288	872	342	10	704	35	3.66	7.73	7.17	7.62	128	29	15	25.7	246	46	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	240000	100	130000	100	
2	Etchepare et al. (2017)	MB: 30 - 70 NB: 0.05 - 0.3	1.97 - 3.94	30	Efluente sintético contaminado con metales	2	Tipo de burbujas y diferencia de presión	MB < NB (2 bar)	3	-	-	-	-	-	-	-	5.5	7	12	0.6	23	-	-	-	30	0.3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-				
								MB > NB (4 bar)	3	-	-	-	-	-	-	-	5.5	10.5	-	-	23	-	-	-	30	1.7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
								NB (2.5 bar)	3	-	-	-	-	-	-	-	5.5	7	-	-	23	-	-	-	10	3.4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
3	Hu & Xia (2017)	0.01 - 1	-	8640 (6 días)	Aguas subterráneas contaminada con tricloroetileno	5	Diferencia de pozos	Pozo 1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-					
								Pozo 2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
								Pozo 3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
								Pozo 4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
								Pozo 5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4	Menendez et al. (2017)	0.024	22	15	Efluentes de hospitales	2	Hora en que la muestra fue tomada	8 a.m.	743	405	132	13	374	28	-	-	7.48	8.6	44.9	4	21.4	21.2	43	9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-					
								11 a.m.	775	530	127	21	297	36	-	-	7.65	8.14	79.5	5.9	21.5	21.6	110	13	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
5	Ventura et al. (2018)	1.479	6.12	60	Sanguaza (efluente pesquero)	2	Diferencia de muestras (promedios)	Muestra 1	-	-	474	140	503.44	158.66	-	-	6.626	7.262	467.4	74.26	20.02	20.14	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	240000	100	130000	100				
								Muestra 2	-	-	410	128	474.64	142.2	-	-	6.48	6.96	332.2	88.8	19.82	19.8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	240000	100	130000	100
6	Valenzuela et al. (2018)	0.024	120.95	24	Aguas residuales industriales	3	Diferencias de Ph	Ph = 6	4280	3010	-	-	-	-	6.13	8.05	6	6	50	11.28	20	21.7	-	-	-	-	32.26	1.52	70.49	29.7	-	-	-	-	-					
								Ph = 8	4280	2850	-	-	-	-	6.13	8.28	6	8	50	22.1	20	21.2	-	-	-	-	32.26	0.08	70.49	13.4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
								Ph = 10	4280	2010	-	-	-	-	6.13	8.28	6	10	50	18.22	20	21.1	-	-	-	-	32.26	0.56	70.49	12.9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
7	Núñez et al. (2019)	<1	5.44	90	Efluentes industriales de lavado	3	Cantidad de muestras	Muestra 1	2410	2320	2133	6.3	3514	102	-	-	8.5	7.5	216	64	26	26	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-					
								Muestra 2	2500	2290	2136	4.4	3681	32	-	-	8.5	7	180.7	51	25	26	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
								Muestra 3	2370	2180	1593	1.9	3296	48.2	-	-	9	7.5	152	42.6	24	25	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
8	Rameshkumar et al. (2019)	0.1 - 0.8	3.84	180	Aguas residuales de diferentes procedencias	4	Procedencia de muestra	Tuberías	-	-	3	<2	11	<4	3.2	6.4	-	-	-	-	-	-	13	9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-						
								Estanques	-	-	18	<2	121	<4	4.2	6.07	-	-	-	-	-	-	38	8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-			
								E. Domésticos	-	-	105	<2	399	<4	<0.2	7.4	-	-	-	-	-	-	300	<1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
								E. Industriales	-	-	2620	0.17	4520	124	-	-	-	-	-	-	-	-	1688	16	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
9	Kim et al. (2020)	0.359	-	45	Agua residual sintética con nanopartículas	3	Tipo de partículas en el efluente	Nylon	-	-	-	-	-	-	7.87	12.58	6.62	6.77	71.05	7.62	23.82	22.24	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-						
								PVC	-	-	-	-	-	-	-	7.99	13.95	6.8	6.83	67.9	1.51	25.27	23.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-			
								Kaolín	-	-	-	-	-	-	-	7.89	14.42	6.65	6.68	65.8	2.21	24.31	23.34	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
10	Sun et al. (2021)	0.1	0.98 - 3.94	200	Soluciones acuosas	3	Presión de aeración	100 kpa	-	-	-	-	-	-	-	-	4	4	-	-	-	-	-	-	15	10	-	-	-	-	-	-	-							
								250 kpa	-	-	-	-	-	-	-	-	-	6	6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	15	9	-	-	-	-	-	-				
								400 kpa	-	-	-	-	-	-	-	-	-	9	8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	15	1.5	-	-	-	-	-	-	-			

Leyenda: A.T.: Antes del tratamiento, D.T.: Después del tratamiento y TCE: Tricloroetileno.

En la Tabla 9 se presenta el reporte de la recopilación de todos los valores de características de las micro/nanoburbujas y parámetros evaluados en el tratamiento de los efluentes la síntesis y recolección de datos específicos de los diez artículos que lograron reunir todos los criterios de inclusión para su evaluación a texto completo, resaltando: las características de las micro/nanoburbujas, de los efluentes y de los parámetros evaluados.

Respecto a las características de las burbujas recolectadas en la experimentación se obtuvo que todas las evaluaciones midieron el tamaño de las burbujas como característica principal para determinar su efectividad durante la experimentación de todos los artículos. Los diámetros de las burbujas estuvieron establecidos desde los 0.01 μm hasta los 70 μm . Mientras que la presión fue medida en 8 investigaciones, las cuales estuvieron establecidas entre 0.98 atm y 120.95 atm. El tiempo de aplicación de las micro/nanoburbujas en todas las investigaciones osciló desde el mínimo de 15 minutos hasta 6 días.

Respecto a los parámetros evaluados, nueve de las diez investigaciones midieron parámetros físico químicos, mientras que solo dos evaluaron parámetros inorgánicos (niveles de hierro en uno de ellos y plomo y silicio en el otro), solo una investigación contempló un parámetro orgánico (tricloroetileno) y dos de ellas midieron parámetros microbiológicos (coliformes totales y termotolerantes).

Para poder cuantificar la eficiencia de remoción de parámetros contaminantes de los efluentes tratados por los autores, se realizó la siguiente ecuación:

$$\text{Eficiencia de remoción} = \frac{(C_i - C_f)}{C_i} \times 100\% \quad (1)$$

Donde:

C_i = Concentración previa al tratamiento del contaminante principal

C_f = Concentración posterior al tratamiento del contaminante principal

En la tabla 10 se presenta la síntesis de la eficiencia de remoción de los parámetros posterior a la aplicación de micro/nanoburbujas.

Tabla 10. Síntesis de eficiencia de remoción de los parámetros

Autores	Eficiencia de remoción de los parámetros (%)									
	DBO ₅	DQO	Turbidez	SST	Fe	Pb	Si	TCE	Coliformes Totales	Coliformes Termotolerantes
Cruz et al. (2017)	94.2	71.6	56.6	63.8	-	-	-	-	98.1	99.2
	95.6	85.8	65.2	79.3	-	-	-	-	98.9	99.6
	97.1	95.0	77.3	81.3	-	-	-	-	99.9	99.9
Etchepare et al. (2017)	-	-	95.0	-	99.0	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	94.3	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	66.0	-	-	-	-	-
Hu & Xia (2017)	-	-	-	-	-	-	-	99.7	-	-
	-	-	-	-	-	-	-	99.9	-	-
	-	-	-	-	-	-	-	99.8	-	-
	-	-	-	-	-	-	-	99.8	-	-
	-	-	-	-	-	-	-	99.9	-	-
Menendez et al. (2017)	90.2	92.5	91.1	79.1	-	-	-	-	-	-
	83.5	97.9	92.6	88.2	-	-	-	-	-	-
Ventura et al. (2017)	70.5	68.5	84.1	-	-	-	-	-	99.9	99.9
	68.8	70.0	73.3	-	-	-	-	-	99.9	99.9
Valenzuela et al. (2018)	-	-	77.4	-	-	95.3	57.9	-	-	-
	-	-	55.8	-	-	99.8	80.9	-	-	-
	-	-	63.6	-	-	98.3	81.7	-	-	-
Núñez et al. (2019)	99.7	97.1	70.4	-	-	-	-	-	-	-
	99.8	99.1	71.8	-	-	-	-	-	-	-
	99.9	98.5	71.9	-	-	-	-	-	-	-
Rameshkumar et al. (2019)	36.7	64.5	-	30.7	-	-	-	-	-	-
	88.9	96.7	-	78.9	-	-	-	-	-	-
	98.1	98.9	-	99.6	-	-	-	-	-	-
	99.9	97.3	-	99.1	-	-	-	-	-	-
Kim et al. (2020)	-	-	89.3	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	97.8	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	96.6	-	-	-	-	-	-	-
Sun et al. (2021)	-	-	-	-	33.3	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	40.0	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	90.0	-	-	-	-	-

Los parámetros que mayor eficiencia de remoción presentaron en las investigaciones fueron tricloroetileno, coliformes totales y termotolerantes llegando a alcanzar hasta 99.9% de eficiencia de remoción.

Todas las investigaciones fueron sometidas a la escala Newcastle – Ottawa para poder asegurar su calidad metodológica y evitar el sesgo científico, observándose que solo la investigación de Hu & Xia (2017) no evaluó parámetros secundarios durante su proceso de experimentación (Tabla 11).

Tabla 11. Calidad metodológica de los estudios seleccionados, a través de la escala Newcastle – Ottawa

#	Autor	Escala de Newcastle – Ottawa								Total
		Selección				Comparabilidad		Resultado		
		Representatividad	Corte de estudios	Exposición	Validez	Controles primarios	Controles secundarios	Evaluación del resultado	Seguimiento	
1	Cruz et al. (2017)	★	★	★	★	★	★	★	★	8 ★
2	Etchepare et al. (2017)	★	★	★	★	★	★	★	★	8 ★
3	Hu & Xia (2017)	★	★	★	★	★	-	★	★	7 ★
4	Menendez et al. (2017)	★	★	★	★	★	★	★	★	8 ★
5	Ventura et al. (2017)	★	★	★	★	★	★	★	★	8 ★
6	Valenzuela et al. (2018)	★	★	★	★	★	★	★	★	8 ★
7	Núñez et al. (2019)	★	★	★	★	★	★	★	★	8 ★
8	Rameshkumar et al. (2019)	★	★	★	★	★	★	★	★	8 ★
9	Kim et al. (2020)	★	★	★	★	★	★	★	★	8 ★
10	Sun et al. (2021)	★	★	★	★	★	★	★	★	8 ★

Leyenda: **Representatividad:** La muestra realmente representa a los efluentes contaminados, **Corte de estudios:** corresponde al corte de estudios de enero 2017 a mayo 2020, **Exposición:** evalúa si las concentraciones iniciales de los parámetros de los efluentes contaminados fueron descritas, y si la aplicación de micro/nanoburbujas fue eficiente para disminuir los contaminantes, **Validez:** Demostración que los autores no tenían el resultado antes de haber iniciado el estudio, **Controles primarios:** Existe comparación de diferentes muestras basados en reducir un contaminante principal, **Controles secundarios:** Existe comparación de diferentes muestras basados en reducir también contaminantes secundarios, **Evaluación del resultado:** Indica si las concentraciones iniciales de los contaminantes primarios (y secundarios) fueron disminuidos de manera significativa y **Seguimiento:** si realiza una evaluación de los efluentes contaminados pre y post aplicación de microorganismos.

Metaanálisis

Para el metaanálisis se realizó una síntesis de los datos obtenidos en la Tabla 9, agrupando solo los artículos que presentan evaluaciones de contaminantes semejantes.

Cinco de los diez artículos trabajaron con demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅) y demanda química de oxígeno (DQO) los cuales fueron comparados durante el metaanálisis. Adicionándose un porcentaje de eficiencia de remoción del contaminante principal usando micro/nanoburbujas en los efluentes tratados en todas las investigaciones seleccionadas. Para esto se utilizó la ecuación 1, previamente presentada.

En la Tabla 12 se presentan los datos sintetizados para realizar el metaanálisis referente a la demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅).

Tabla 12. Datos sintetizados para realizar el metaanálisis con el contaminante DBO₅

DBO ₅						
#	Efluente tratado	Concentración muestra 1 (mg/L)	Eficiencia de remoción (%)	Concentración muestra 2 (mg/L)	Eficiencia de remoción (%)	Autor
1	Efluente doméstico	342	94	342	96	Cruz et al. (2017)
2	Efluentes de hospitales	132	90	127	83	Menendez et al. (2017)
3	Sanguaza (efluente pesquero)	474	70	410	69	Ventura et al. (2018)
4	Efluentes industriales de lavado	2136	100	2133	100	Núñez et al. (2019)
5	Aguas residuales de diferentes procedencias	2620	100	105	99	Rameshkumar et al. (2019)

En la Figura 6 se evidencia los cinco artículos incluidos para el metaanálisis con el contaminante DBO₅, en cada uno de ellos se realizó un análisis de la eficiencia de remoción posterior al tratamiento con micro/nanoburbujas. En el primer y segundo ensayo se evidencia valores ligeramente aproximados (mg/L).

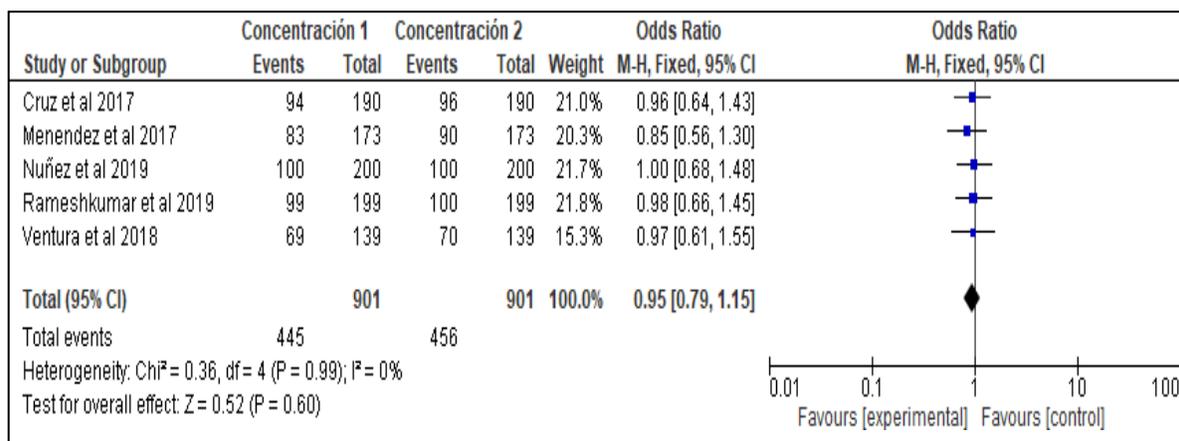


Figura 6. Metaanálisis de la eficiencia de remoción del contaminante DBO₅, posterior al tratamiento con micro/nanoburbujas

La razón de momios (Odds Ratio) permite evaluar el efecto del ensayo con respecto a la protección o riesgo en una población, de acuerdo a los siguientes intervalos:

- Odds < 1: La muestra presenta menor eficiencia de remoción de contaminantes posterior al tratamiento de micro/nanoburbujas.
- Odds > 1: El ensayo presenta mayor eficiencia de remoción de contaminantes posterior al tratamiento de micro/nanoburbujas
- Odds = 1: El ensayo no presenta ninguna variación

La razón de momios (Odds Ratio) fue de 0.95, esto indica que en el tratamiento de micro/nanoburbujas en la primera muestra presento menor eficiencia de remoción en un 5%. Los artículos científicos incluidos no evidenciaron una heterogeneidad estadística de P = 0.99 e I² = 0%, esto indica que los resultados de los ensayos 1 y 2 presentan una variabilidad nula.

En la Figura 7 se puede observar la comparación de las cinco investigaciones que fueron sometidas al metaanálisis, destacando Núñez y Rameshkumar como los autores que lograron casi un 100% de remoción de la DBO₅.

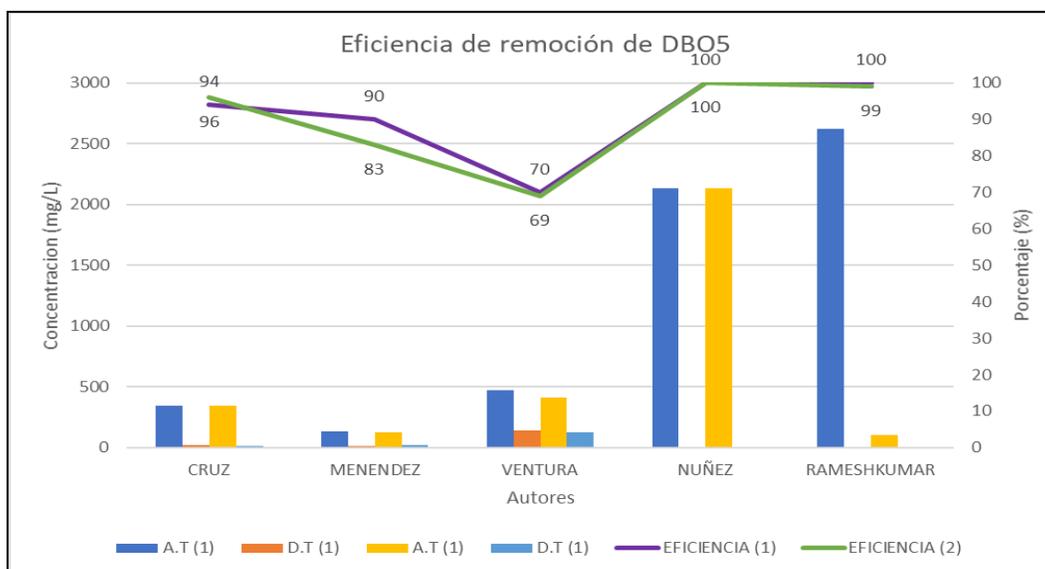


Figura 7. Gráfico de comparación de eficiencia de remoción de DBO₅

Elaboración Propia.

En la Tabla 13 se presentan los datos sintetizados para realizar el metaanálisis referente a la demanda química de oxígeno (DQO).

Tabla 13. Datos sintetizados para realizar el metaanálisis con el contaminante DQO

DQO						
#	Efluente tratado	Concentración muestra 1 (mg/L)	Eficiencia de remoción (%)	Concentración muestra 2 (mg/L)	Eficiencia de remoción (%)	Autor
1	Efluente doméstico	704	72	704	86	Cruz et al. (2017)
2	Efluentes de hospitales	374	93	297	88	Menendez et al. (2017)
3	Sanguaza (efluente pesquero)	503	68	475	70	Ventura et al. (2018)
4	Efluentes industriales de lavado	3514	97	3681	99	Núñez et al. (2019)
5	Aguas residuales de diferentes procedencias	4520	97	399	99	Rameshkumar et al. (2019)

En la Figura 8 se evidencia los cinco artículos incluidos para el metaanálisis con el contaminante DQO, en cada uno de ellos se realizó un análisis de la eficiencia de remoción posterior al tratamiento con micro/nanoburbujas. En el primer y segundo ensayo se evidencia valores ligeramente aproximados (mg/L).

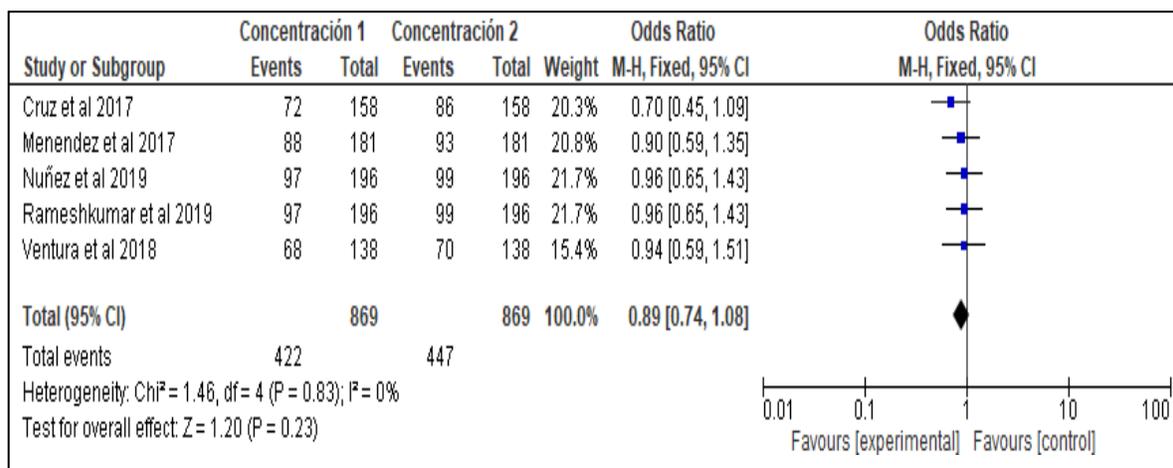


Figura 8. Metaanálisis de la eficiencia de remoción del contaminante DQO, posterior al tratamiento con micro/nanoburbujas

Para este caso la razón de momios (Odds Ratio) permite evaluar el efecto del ensayo con respecto a la protección o riesgo en una población, de acuerdo a los siguientes intervalos:

- Odds < 1: La muestra presenta menor eficiencia de remoción de contaminantes posterior al tratamiento de micro/nanoburbujas.
- Odds > 1: El ensayo presenta mayor eficiencia de remoción de contaminantes posterior al tratamiento de micro/nanoburbujas
- Odds = 1: El ensayo no presenta ninguna variación

La razón de momios (Odds Ratio) fue de 0.89, esto indica que en el tratamiento de micro/nanoburbujas en la primera muestra presento menor eficiencia de remoción en un 11%. Los artículos científicos incluidos no evidenciaron una heterogeneidad estadística de $P = 0.83$ e $I^2 = 0\%$, esto indica que los resultados de los ensayos 1 y 2 presentan una variabilidad nula.

En la Figura 9 se puede observar la comparación de las cinco investigaciones que fueron sometidas al metaanálisis, destacando nuevamente a Núñez y Rameshkumar como los autores que lograron casi entre 97 y 99% de remoción de la DQO.

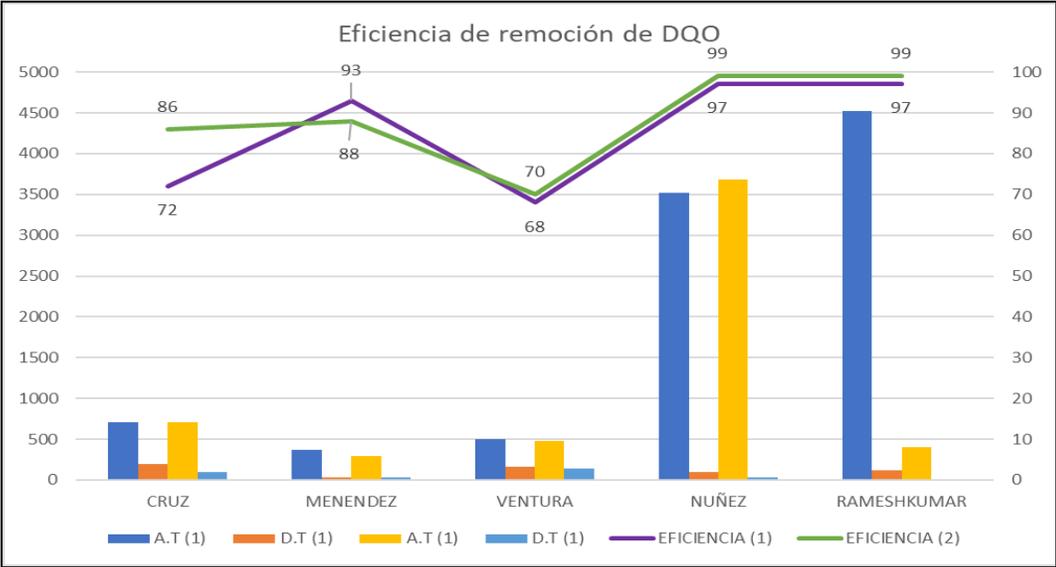


Figura 9. Gráfico de comparación de eficiencia de remoción de DQO

V. DISCUSIÓN

A partir de la revisión sistemática y metaanálisis, la eficiencia de remoción de las micro/nanoburbujas en los efluentes contaminados fue evaluada en función de porcentajes para cuantificar el potencial de esta técnica. De acuerdo a las investigaciones de Rameshkumar et al. (2019) y Núñez et al. (2019), el DBO₅ fue removido de los efluentes contaminados en casi un 100%. Asimismo, estas investigaciones fueron los que mayores valores de peso (Weigth) presentaron en el metaanálisis, obteniendo un 21.7 y 21.8% respectivamente, indicando que dichos estudios presentaron mayor eficiencia de remoción del contaminante DBO₅, posterior al tratamiento con micro/nanoburbujas. Mientras que Ventura et al. (2018) presentó la menor eficiencia de remoción, solo alcanzando un 70%. Sin embargo, estos continúan siendo porcentajes óptimos que demuestran la eficiencia del tratamiento de efluentes contaminados con las nanoburbujas.

Referente a la comparación de DQO, también la mayor eficiencia de remoción se dio en las investigaciones de Rameshkumar et al. (2019) y Núñez et al. (2019), obteniendo porcentajes de eficiencia de remoción que oscilan entre 97 y 99%. Asimismo, estas investigaciones fueron los que mayores valores de peso (Weigth) presentaron en el metaanálisis, obteniendo un 21.7 y 21.7% respectivamente. Mientras la que presentó menor eficiencia de remoción fue nuevamente la investigación de Ventura et al. (2018) solo alcanzando un 70% de eficiencia de remoción. Sin embargo, estos continúan siendo porcentajes óptimos que demuestran la eficiencia del tratamiento de efluentes contaminados con las nanoburbujas.

A pesar que las demás investigaciones presentes en la revisión sistemáticas no evaluaron las concentraciones de los contaminantes de DBO₅ y DQO, tuvieron contaminantes principales que también fueron reducidos eficientemente usando el tratamiento de micro/nanoburbujas.

De acuerdo con la investigación de Etchepare et al. (2017), al combinar las microburbujas y las nanoburbujas para obtener una gran eficiencia de remoción del

contaminante de Fe^{+3} , se presentó los valores máximos de 66 y 99% de eficiencia de remoción. Igualmente, Sun et al. (2021) utilizaron la técnica de las nanoburbujas para la remoción de hierro, llegando a alcanzar resultados de 79 y 100% de eficiencia de remoción. Sin embargo, en esta investigación se puede resaltar que cuando la presión de aireación aumentaba, el tamaño de las micro/nanoburbujas disminuía.

En la investigación de Rameshkumar et al. (2019), se demostró que las nanoburbujas redujeron significativamente los sólidos suspendidos totales (SST), la demanda química de oxígeno, la demanda bioquímica de oxígeno, entre otros parámetros encontrados en el agua potable, agua de estanques, efluentes domésticos e industriales; se demostró una gran eficiencia de remoción llegando a alcanzar hasta un 99%.

Con respecto a metales pesados, Valenzuela et al. (2018) utilizaron micro/nanoburbujas de aire y ozono en aguas residuales de lavado de gases de una empresa, debido a que los contaminantes de Plomo y Silicio excedían los Estándares de Calidad Ambiental (ECA), es por ello que se realizó un cálculo de la eficiencia de reducción de dichos contaminantes, logrando un porcentaje de remoción de un 100%.

Por otro lado, en la investigación de Hu & Xia (2017) con su contaminante de tricloroetileno (TCE) en aguas subterráneas, utilizaron las micro/nanoburbujas de ozono como tratamiento para su remoción, las cuales soportaron condiciones altamente salinas, mostrando resultados eficientes de 97 y 100% en ambas muestras.

De acuerdo con la investigación de Menéndez et al. (2017), realizaron el tratamiento de efluentes de hospitales usando micro/nanoburbujas con diámetros menores a $1\ \mu m$ para la reducción de materia orgánica, tomando dos muestras una a las 8 am y otra a las 11 am. Considerando como contaminantes principales a la demanda bioquímica de oxígeno (DBO_5) se obtuvo una eficiencia de remoción de

92.51 y 87.88%, respectivamente, mientras que respecto a la demanda química de oxígeno (DQO) se obtuvo resultados de eficiencia de 90.15 y 83.47%.

Asimismo, Kim et al. (2020), en su investigación puso a prueba de la eficiencia de las nanoburbujas en efluentes con tres diferentes nanopartículas: nylon, policloruro de vinilo y caolinita. Usando un método de flotación con micro/nanoburbujas de 359 nm de diámetro y tomando como contaminante principal a la turbidez, se obtuvo un 89.27, 97.74 y 96.64% de eficiencia de remoción respectivamente.

En la investigación de Cruz et al. (2017) se buscó mejorar la calidad de efluentes domésticos por lo que se tomó una muestra de 4 litros de aquel efluente y luego se le sometió a tres diferentes técnicas de tratamiento con micro/nanoburbujas (MNBs) con un diámetro promedio de 7 μm , una de ellas combinando 750 ml del efluente con 250 ml de agua con presencia de MNBs, otra con 500 ml de efluente y 500 ml de agua con presencia de MNBs, y por último una con 250 ml de efluente y 750 ml de agua con presencia de MNBs. Tomando como contaminante principal a los sólidos suspendidos totales se obtuvo como eficiencia de remoción 63.82, 79.27 y 81.30% respectivamente.

Núñez et al. (2019) evaluaron en su investigación la eficiencia del uso de micro/nanoburbujas de diámetros menores a 1 μm para el tratamiento de efluentes industriales de lavado, se tomaron tres muestras y se evaluó su reducción de los contaminantes después de la aplicación por 90 minutos. Tomando a la turbidez como el contaminante principal se obtuvo 70.37, 71.77 y 71.97% de eficiencia de remoción respectivamente.

Ventura et al. (2018) comprobaron la eficiencia del tratamiento de micro/nanoburbujas en efluentes industriales pesqueros (sanguaza), este efluente presenta altas concentraciones de materia orgánica por lo que se tomó como contaminantes principales a la demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅) y la demanda química de oxígeno (DQO). Los autores tomaron 2 muestras, realizando

5 repeticiones con cada una, midiendo posterior a 60 minutos de tratamiento continuo cada repetición, para así obtener promedios de cada muestra. Se logró identificar una eficiencia de remoción promedio de DBO₅ de 68.48 y 70.04%; mientras que la eficiencia de remoción promedio de DQO fue de 70.46 y 68.78%.

Todas las investigaciones concluyen que el uso del tratamiento de micro/nanoburbujas es eficiente para remover diversos contaminantes y de esa forma recuperando aguas contaminadas a sus condiciones originales.

VI. CONCLUSIONES

Los diez artículos seleccionados mediante la revisión sistemática junto con los que fueron sometidos al metaanálisis indicaron que el tratamiento de efluentes contaminados mediante el uso de micro/nanoburbujas es eficiente sobre todo en la reducción de contaminantes indicadores de materia orgánica (DBO₅ y DQO). Entre los resultados más relevantes se tiene:

1. Se demostró que la aplicación de micro/nanoburbujas es eficiente en el tratamiento de efluentes contaminados debido a que todas las investigaciones alcanzaron remover la concentración de DBO₅ y DQO desde un 68 hasta un 100%.

2. El tratamiento de micro/nanoburbujas demostró mayor eficiencia de remoción en los contaminantes inorgánicos y microbiológicos como las concentraciones tricloroetileno (TCE), coliformes totales y termotolerantes. Las micro/nanoburbujas redujeron la concentración de estos contaminantes en los efluentes hasta en un 99.9% en cada estudio evaluado.

3. Las características físicas de las micro/nanoburbujas que se observaron en los artículos evaluados tenían un diámetro establecido desde 0.01 hasta 70 μm y una presión interna entre 0.98 y 120.95 atm.

VII. RECOMENDACIONES

- Realizar revisiones sistemáticas y metaanálisis referente a los tratamientos de efluentes contaminados, concentrándose en parámetros inorgánicos y microbiológicos.
- Analizar las investigaciones en el área ambiental teniendo en cuenta estándares de calidad ambiental nacionales e internacionales.
- Utilizar una escala de calidad de estudios que mejor se adapte a la investigación.
- Aplicar ecuaciones de búsquedas suficientemente consistentes para conseguir la mayor cantidad de resultados.
- Recolectar artículos científicos de bases de datos de mejor calidad científica como lo son Scopus, Web of Science, entre otros.

REFERENCIAS

ACHAR, J.C., NAM, G., JUNG, J., KLAMMLER, H. y MOHAMED, M.M. Microbubble ozonation of the antioxidant butylated hydroxytoluene: Degradation kinetics and toxicity reduction. *Environmental Research* [en línea]. 11 de abril del 2020. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0013935120303893>

ÁLVAREZ, Fiorela y RIOS, Luis. Revisión sistemática y meta-análisis sobre el uso de carbón activado para la adsorción de antibióticos en aguas residuales. Tesis (Titulado en Ingeniería Ambiental). Lima: Universidad Cesar Vallejo, 2020. Disponible en: <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/59811>

AZEVEDO, A. & et al. Aqueous dispersions of nanobubbles: Generation, properties and features. *Revista Elsevier B.V.* [en línea]. *Minerals Engineering* (94). 01 de agosto del 2016. [Fecha de consulta: 20 de abril del 2021]. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0892687516301212?via%3Dihub>. ISSN: 08926875

AZEVEDO, A. & et al. Removal of ferric hydroxide by flotation with micro and nanobubbles. *Revista Elsevier B.V.* [en línea]. *Separation and Purification Technology* (184). 31 de agosto del 2017. [Fecha de consulta: 15 de abril del 2021]. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1383586617303374>

AZUMA, T., OTOMO, K., KUNITOU, M., SHIMIZU, M., HOSOMARU, K., MIKATA, S., MINO, Y. y HAYASHI, T. Removal of pharmaceuticals in water by introduction of ozonated microbubbles. *Separation and Purification Technology* [en línea]. 2 de Agosto del 2019. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1383586618324195>. ISSN 18733794.

BATAGODA, J.H., HEWAGE, S.D.A. y MEEGODA, J.N. Nano-ozone bubbles for drinking water treatment. *Journal of Environmental Engineering and Science*. Noviembre del 2018. Disponible en:

https://www.researchgate.net/publication/329103025_Nano-Ozone_Bubbles_for_Drinking_Water_Treatment. ISSN 1496256X.

BIELEN, A., ŠIMATOVIĆ, A., KOSIĆ-VUKŠIĆ, J., SENTA, I., AHEL, M., BABIĆ, S., JURINA, T., GONZÁLEZ PLAZA, J.J., MILAKOVIĆ, M. y UDIKOVIĆ-KOLIĆ, N. Negative environmental impacts of antibiotic-contaminated effluents from pharmaceutical industries. *Water Research*. Diciembre del 2017. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S004313541730773X>. ISSN 18792448.

BUI, T.T., NAM, S.N. y HAN, M. Micro-Bubble Flotation of Freshwater Algae: A Comparative Study of Differing Shapes and Sizes. *Separation Science and Technology (Philadelphia)*. Marzo del 2015. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/272162229_Micro-Bubble_Flotation_of_Freshwater_Algae_A_Comparative_Study_of_Differing_Shapes_and_Sizes. ISSN 15205754.

CALGAROTO, S., AZEVEDO, A. y RUBIO, J. Separation of amine-insoluble species by flotation with nano and microbubbles. *Minerals Engineering* [en línea]. Abril del 2016. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.mineng.2016.01.006>. ISSN 08926875.

DAYARATHNE, H.N.P., JEONG, S. y JANG, A. Chemical-free scale inhibition method for seawater reverse osmosis membrane process: Air micro-nano bubbles. *Desalination* [en línea]. 1 de julio del 2019. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2019.03.008>. ISSN 00119164

ETCHEPARE, R., AZEVEDO, A., CALGAROTO, S. y RUBIO, J. Removal of ferric hydroxide by flotation with micro and nanobubbles. *Separation and Purification Technology* [en línea]. 31 de Agosto del 2017. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.seppur.2017.05.014>. ISSN 18733794

GRACE, K., SENTHIL, P., CAROLIN, F. y SARAVANAN, A. Removal of toxic Cr(VI) ions from tannery industrial wastewater using a newly designed three-phase three-dimensional electrode reactor. *Journal of Physics and Chemistry of Solids* [en

línea]. Noviembre del 2017. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jpccs.2017.07.002>. ISSN 00223697.

HARIS, S., QIU, X., KLAMMLER, H. y MOHAMED, M.M.A. The use of micro-nano bubbles in groundwater remediation: A comprehensive review. *Groundwater for Sustainable Development* [en línea]. Octubre del 2020. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2020.100463> . ISSN 2352801X.

HERNÁNDEZ, C. Efectos de Micro y Nano Burbujas en Tratamientos de Aguas Residuales Domésticas: El caso de Pasca, Cundinamarca [en línea]. Universidad de Cundinamarca. 23 de septiembre del 2019. Disponible en: <http://repositorio.ucundinamarca.edu.co/handle/20.500.12558/2334>

HU, L. & XIA, Z. Application of ozone micro-nano-bubbles to groundwater remediation. *Journal of Hazardous Materials* [en línea]. 15 de junio del 2018. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2017.08.030>. ISSN 18733336.

JINDO, Keiji & MORIKAWA, Marino. Innovative Feasibility Study for the Reclamation of the Cascajo Wetlands in Perú Utilizing Sustainable Technologies. *Water Magazine* [en línea]. 12 (1097). 12 de abril del 2021. [Fecha de consulta 31 de abril del 2021]. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/w12041097>. ISSN: 20734441

KHAN, P., ZHU, W., HUANG, F., GAO, W. y KHAN, N.A. Micro-nanobubble technology and water-related application. *Water Science and Technology: Water Supply*. 10 de junio de 2020. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/342061795_Micro-nano_bubbles_technology_and_the_water-related_application. ISSN 16070798.

KIM, Mi-Sug; HAN, Mooyoung; KIM, Tschung-II.; LEE, Jae-Wook & KWAK, Dong-Heui. Effect of nanobubbles for improvement of water quality in freshwater: Flotation model simulation. *Revista Elsevier B.V.* [en línea]. *Separation and Purification Technology* (241). 15 de junio del 2020. [Fecha de consulta: 16 de abril del 2021]. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1383586619346623>

LIU, C. & TANG, Y. Application research of micro and nano bubbles in water pollution control. Enero del 2019. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/337867623_Application_research_of_micro_and_nano_bubbles_in_water_pollution_control . ISSN 22671242.

LIU, Chun & et al.. Advanced treatment of bio-treated coal chemical wastewater by a novel combination of microbubble catalytic ozonation and biological process 2018). Revista Elsevier B.V. [en línea]. Separation and Purification Technology (197). 31 de mayo del 2018. [Fecha de consulta: 15 de abril del 2021]. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1383586617326977?via%3Dihub>. ISSN: 13835866

NÚÑEZ, T. Tratamiento de aguas residuales de una Embotelladora de Bebidas Carbonatadas aplicando nanoburbujas de aire [en línea]. S.l.: Universidad cesar Vallejo, 2019. Disponible en: <http://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/32303><http://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/32303>

RYSKIE, S., GONZALEZ-MERCHAN, C., NECULITA, C.M. y GENTY, T. Efficiency of ozone microbubbles for ammonia removal from mine effluents. Minerals Engineering [en línea]. 2020 Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2019.106071>

SARANYA, D. & SHANTHAKUMAR, S. An integrated approach for tannery effluent treatment with ozonation and phycoremediation: A feasibility study. Environmental Research. Abril del 2020. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0013935120300554>. ISSN 10960953.

SUN, Y., XIE, G., PENG, Y., XIA, W. & SHA, J. Stability theories of nanobubbles at solid-liquid interface: A review. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects [en línea]. 20 de abril del 2016.

Disponible

en:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0927775716300504>

TEKILE, A., KIM, I. y LEE, J.-Y. Applications of Ozone Micro- and Nanobubble Technologies in Water and Wastewater Treatment: Review. Journal of the Korean Society of Water and Wastewater. Diciembre del 2017. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/323420025_Applications_of_Ozone_Micro-_and_Nanobubble_Technologies_in_Water_and_Wastewater_Treatment_Review. ISSN 1225-7672.

TEMESGEN, T., BUI, T.T., HAN, M., KIM, T. il & PARK, H., 2017. Micro and nanobubble technologies as a new horizon for water-treatment techniques: A review. Advances in Colloid and Interface Science [en línea]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cis.2017.06.011>. ISSN 00018686

WANG, Lei; ALI, Jafar; WANG, Zhibin.; OLADOJA, N.A.; CHENG, Rong; ZHANG, Changbo, MAILHOT, Gilles & PAN, Gang. Oxygen nanobubbles enhanced photodegradation of oxytetracycline under visible light: Synergistic effect and mechanism. Revista Elsevier B.V. [en línea]. Chemical Engineering Journal (388). 15 de mayo del 2020. [Fecha de consulta: 30 de abril del 2021]. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1385894720302187>.

WWAP (Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos de las Naciones Unidas). Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2017 - Aguas residuales: El recurso desaprovechado [en línea]. París, UNESCO [s.n.]. 2017. 17 pp. ISBN: 9789233000582

XIAO, Z., LI, D., WANG, F., SUN, Z. y LIN, Z. Simultaneous removal of NO and SO₂ with a new recycling micro-nano bubble oxidation-absorption process based on HA-Na. Separation and Purification Technology [en línea]. 1 de julio del 2020. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2020.116788>. ISSN 18733794

ZHAO, Y., CHANG, W., HUANG, Z., FENG, X., MA, L., QI, X. y LI, Z., 2017. Enhanced removal of toxic Cr(VI) in tannery wastewater by photoelectrocatalysis with synthetic TiO₂ hollow spheres. Applied Surface Science [en línea]. 31 de mayo del 2017. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0169433217303434>. ISSN 01694332

ZHENG, T., WANG, Q., ZHANG, T., SHI, Z., TIAN, Y., SHI, S., SMALE, N. y WANG, J. Microbubble enhanced ozonation process for advanced treatment of wastewater produced in acrylic fiber manufacturing industry. Journal of Hazardous Materials [en línea]. 28 de abril del 2015. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0304389415000801>

ANEXOS

ANEXO 1. Matriz de operacionalización de variables

Uso de micro/nanoburbujas para el tratamiento de efluentes contaminados: Una revisión sistemática y metaanálisis						
Variable		Definición Conceptual	Definición Operacional	Dimensiones	Indicadores	Unidad de Medida
Independiente	Micro / nanoburbujas	Son burbujas que poseen una gran estabilidad, lo cual ayuda en la disminución de la fuerza flotante y la presencia de fuerzas repulsivas de tales burbujas entre sí (Vásquez, M., 2020).	Las micro/nanoburbujas fueron evaluadas según sus características físicas (diámetro, presión interna y concentración) y su tiempo de aplicación en las investigaciones.	Características físicas	Diámetro de la burbuja	µm
					Presión interna de la MNB	atm
					Concentración	mg/L
				Aplicación	Tiempo	min
Dependiente	Tratamiento de efluentes contaminados	Los efluentes contaminados son aquellos cuya estructura fue modificada por lo cual no reúne las condiciones elementales para el uso que estuvo designado en su estado natural. (OMS, S.F.).	El tratamiento de los efluentes contaminados fue evaluado según sus parámetros físico-químicos, inorgánicos, orgánicos y microbiológicos.	Físico-químicas	Conductividad eléctrica	µS/cm
					DBO ₅	mg/L
					DQO	mg/L
					Oxígeno disuelto	mg/L
					pH	unidad de pH
					Turbidez	NTU
					Temperatura	°C
				Inorgánicas	Sólidos suspendidos totales	mg/L
					Hierro (Fe)	mg/L
					Plomo (Pb)	mg/L
				Orgánicas	Silicio (Si)	mg/L
					Tricloroetileno (TCE)	mg/L
				Microbiológicos	Coliformes totales	NMP/100 ml
Coliformes termotolerantes	NMP/100 ml					

ANEXO 2. Validación de instrumentos

Ficha 1. Ficha de síntesis, recolección y selección de estudio para revisión sistemática y metaanálisis

Título		Uso de micro/nanoburbujas para el tratamiento de efluentes contaminados: Una revisión sistemática y metaanálisis				
Línea de Investigación		Tratamiento y Gestión de los Residuos				
Responsables		Belahonia Talledo, Renato Leonel				
		García Espejo, Lucero Marielena				
Asesor		Dr. Carlos A. Castañeda Olivera				
Nro.	Autor y año	Título	Objetivo	Técnica o metodología	Revista	Hallazgos

Dr. RUBEN MUNIVE CERRON
CIP N° 38103

Ing. AHUBER OMAR VÁSQUEZ ARANDA
CIP N° 92507

Atentamente,

Juan Julio Ordoñez Galvez

DNI: 08447308

Ficha 2. Ficha de síntesis y recolección de datos específicos de los estudios seleccionados

Título		Uso de micro/nanoburbujas para el tratamiento de efluentes contaminados: Una revisión sistemática y metaanálisis					
Línea de Investigación		Tratamiento y Gestión de los Residuos					
Responsables		Belahonia Talledo, Renato Leonel					
		García Espejo, Lucero Marielena					
Asesor		Dr. Carlos A. Castañeda Olivera					
Nro.	Autor y año	Título	Ámbito geográfico	Características de NB evaluadas	Efluente tratado	Contaminant e principal	Parámetros evaluados



Dr. RUBEN MUNIVE CERRON
CIP N° 38103



Ing. AHUBER OMAR VÁSQUEZ ARANDA
CIP N° 92507

Atentamente,



Juan Julio Ordoñez Galvez
DNI: 08447308

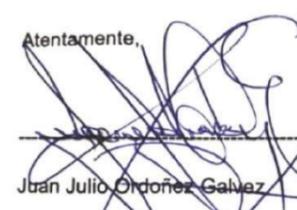
Ficha 3. Ficha de parámetros previa y posterior a la aplicación de la técnica de micro/nanoburbujas en los estudios seleccionados

Título		Uso de micro/nanoburbujas para el tratamiento de efluentes contaminados: Una revisión sistemática y metaanálisis																												
Línea de Investigación		Tratamiento y Gestión de los Residuos																												
Responsables		Belahonia Talledo, Renato Leonel García Espejo, Lucero Marielena																												
Asesor		Dr. Carlos A. Castañeda Olivera																												
Nro.	Autor	Micro/nanoburbujas			Tratamiento de efluentes contaminados																									
		Diámetro (µm)	Presión (atm)	Tiempo (minutos)	Tipo	Muestras		Parámetros evaluados																						
						Indicador de diferencia		Físicos - químicos										Inorgánicos				Orgánicos		Microbiológicos						
						Indicador	Descripción	C.E. (µs/cm)		DBOs (mg/L)		DQO (mg/L)		Oxígeno disuelto (mg/L)		Ph (mg/L)		Turbidez (UNT)		Temperatura (°C)		SST (mg/L)		Fe (mg/L)		Pb (mg/L)		Si (mg/L)		TCE (mg/L)
		A.T.	D.T.	A.T.	D.T.	A.T.	D.T.	A.T.	D.T.	A.T.	D.T.	A.T.	D.T.	A.T.	D.T.	A.T.	D.T.	A.T.	D.T.	A.T.	D.T.	A.T.	D.T.	A.T.	D.T.	A.T.	D.T.	A.T.	D.T.	

Leyenda: **A.T.:** Antes del tratamiento, **D.T.:** Después del tratamiento y **TCE:** Tricloroetileno.


Dr. RUBEN MUNIVE CERRON
CIP N° 38103


Ing. AHUBER OMAR VÁSQUEZ ARANDA
CIP N° 92507

Atentamente,

Juan Julio Ordoñez Galvez
DNI: 08447308

VALIDACIÓN DE INSTRUMENTO

I. DATOS GENERALES

- 1.1. Apellidos y Nombres: Ordoñez Gálvez, Juan Julio
- 1.2. Cargo e institución donde labora: Docente e Investigador/UCV Lima Norte.....
- 1.3. Nombre del instrumento motivo de evaluación: Ficha de síntesis, recolección y selección de estudio para metanálisis ...
- 1.4. Autor(A) de Instrumento: Belahonia Talledo, Renato Leonel / García Espejo, Lucero Marielena

II. ASPECTOS DE VALIDACIÓN

CRITERIOS	INDICADORES	INACEPTABLE						MINIMAMENTE ACEPTABLE			ACEPTABLE			
		40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100
1. CLARIDAD	Esta formulado con lenguaje comprensible.											X		
2. OBJETIVIDAD	Esta adecuado a las leyes y principios científicos.											X		
3. ACTUALIDAD	Esta adecuado a los objetivos y las necesidades reales de la investigación.											X		
4. ORGANIZACIÓN	Existe una organización lógica.											X		
5. SUFICIENCIA	Toma en cuenta los aspectos metodológicos esenciales											X		
6. INTENCIONALIDAD	Esta adecuado para valorar las variables de la Hipótesis.											X		
7. CONSISTENCIA	Se respalda en fundamentos técnicos y/o científicos.											X		
8. COHERENCIA	Existe coherencia entre los problemas objetivos, hipótesis, variables e indicadores.											X		
9. METODOLOGÍA	La estrategia responde una metodología y diseño aplicados para lograr probar las hipótesis.											X		
10. PERTINENCIA	El instrumento muestra la relación entre los componentes de la investigación y su adecuación al Método Científico.											X		

III. OPINIÓN DE APLICABILIDAD

- El Instrumento cumple con los Requisitos para su aplicación
- El Instrumento no cumple con Los requisitos para su aplicación

IV. PROMEDIO DE VALORACIÓN :

SI

Atentamente,

90 %



 Juan Julio Ordoñez Gálvez
 DNI: 08447308

VALIDACIÓN DE INSTRUMENTO

V. DATOS GENERALES

- 5.1. Apellidos y Nombres: Ordoñez Gálvez, Juan Julio.....
- 5.2. Cargo e institución donde labora: Docente e Investigador/UCV Lima Norte.....
- 5.3. Nombre del instrumento motivo de evaluación: Ficha de síntesis y recolección de datos específicos de los estudios seleccionados
- 5.4. Autor(A) de Instrumento: Belahonia Talledo, Renato Leonel / García Espejo, Lucero Marielena

VI. ASPECTOS DE VALIDACIÓN

CRITERIOS	INDICADORES	INACEPTABLE					MINIMAMENTE ACEPTABLE			ACEPTABLE				
		40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100
1. CLARIDAD	Esta formulado con lenguaje comprensible.											X		
2. OBJETIVIDAD	Esta adecuado a las leyes y principios científicos.											X		
3. ACTUALIDAD	Esta adecuado a los objetivos y las necesidades reales de la investigación.											X		
4. ORGANIZACIÓN	Existe una organización lógica.											X		
5. SUFICIENCIA	Toma en cuenta los aspectos metodológicos esenciales											X		
6. INTENCIONALIDAD	Esta adecuado para valorar las variables de la Hipótesis.											X		
7. CONSISTENCIA	Se respalda en fundamentos técnicos y/o científicos.											X		
8. COHERENCIA	Existe coherencia entre los problemas objetivos, hipótesis, variables e indicadores.											X		
9. METODOLOGÍA	La estrategia responde una metodología y diseño aplicados para lograr probar las hipótesis.											X		
10. PERTINENCIA	El instrumento muestra la relación entre los componentes de la investigación y su adecuación al Método Científico.											X		

VII. OPINIÓN DE APLICABILIDAD

- El Instrumento cumple con los Requisitos para su aplicación
- El Instrumento no cumple con Los requisitos para su aplicación

VIII. PROMEDIO DE VALORACIÓN :

SI
 NO

Atentamente,

90 %


 Juan Julio Ordoñez Gálvez
 DNI: 08447308



VALIDACIÓN DE INSTRUMENTO

IX. DATOS GENERALES

- 9.1. Apellidos y Nombres: Ordoñez Gálvez, Juan Julio.....
- 9.2. Cargo e institución donde labora: Docente e Investigador/UCV Lima Norte.....
- 9.3. Nombre del instrumento motivo de evaluación: Ficha de parámetros previa y posterior a la aplicación de la técnica de nanoburbujas
- 9.4. Autor(A) de Instrumento: Belahonia Talledo, Renato Leonel / García Espejo, Lucero Marielena

X. ASPECTOS DE VALIDACIÓN

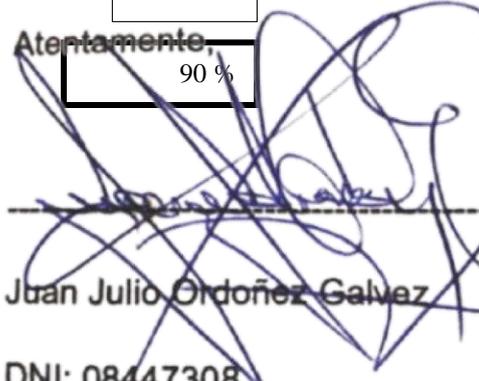
CRITERIOS	INDICADORES	INACEPTABLE					MINIMAMENTE ACEPTABLE			ACEPTABLE				
		40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100
1. CLARIDAD	Esta formulado con lenguaje comprensible.											X		
2. OBJETIVIDAD	Esta adecuado a las leyes y principios científicos.											X		
3. ACTUALIDAD	Esta adecuado a los objetivos y las necesidades reales de la investigación.											X		
4. ORGANIZACIÓN	Existe una organización lógica.											X		
5. SUFICIENCIA	Toma en cuenta los aspectos metodológicos esenciales											X		
6. INTENCIONALIDAD	Esta adecuado para valorar las variables de la Hipótesis.											X		
7. CONSISTENCIA	Se respalda en fundamentos técnicos y/o científicos.											X		
8. COHERENCIA	Existe coherencia entre los problemas objetivos, hipótesis, variables e indicadores.											X		
9. METODOLOGÍA	La estrategia responde una metodología y diseño aplicados para lograr probar las hipótesis.											X		
10. PERTINENCIA	El instrumento muestra la relación entre los componentes de la investigación y su adecuación al Método Científico.											X		

XI. OPINIÓN DE APLICABILIDAD

- El Instrumento cumple con los Requisitos para su aplicación
- El Instrumento no cumple con Los requisitos para su aplicación

XII. PROMEDIO DE VALORACIÓN :

SI
90 %


 Atentamente,
 Juan Julio Ordoñez Gálvez
 DNI: 08447308

VALIDACIÓN DE INSTRUMENTO

I. DATOS GENERALES

- 1.1. Apellidos y Nombres: Munive Cerrón, Rubén Víctor
- 1.2. Cargo e institución donde labora: Docente e Investigador/UCV Lima Norte.....
- 1.3. Nombre del instrumento motivo de evaluación: Ficha de síntesis, recolección y selección de estudio para metanálisis ...
- 1.4. Autor(A) de Instrumento: Belahonia Talledo, Renato Leonel / García Espejo, Lucero Marielena

II. ASPECTOS DE VALIDACIÓN

CRITERIOS	INDICADORES	INACEPTABLE						MINIMAMENTE ACEPTABLE			ACEPTABLE			
		40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100
1. CLARIDAD	Esta formulado con lenguaje comprensible.											X		
2. OBJETIVIDAD	Esta adecuado a las leyes y principios científicos.											X		
3. ACTUALIDAD	Esta adecuado a los objetivos y las necesidades reales de la investigación.											X		
4. ORGANIZACIÓN	Existe una organización lógica.											X		
5. SUFICIENCIA	Toma en cuenta los aspectos metodológicos esenciales											X		
6. INTENCIONALIDAD	Esta adecuado para valorar las variables de la Hipótesis.											X		
7. CONSISTENCIA	Se respalda en fundamentos técnicos y/o científicos.											X		
8. COHERENCIA	Existe coherencia entre los problemas objetivos, hipótesis, variables e indicadores.											X		
9. METODOLOGÍA	La estrategia responde una metodología y diseño aplicados para lograr probar las hipótesis.											X		
10. PERTINENCIA	El instrumento muestra la relación entre los componentes de la investigación y su adecuación al Método Científico.											X		

III. OPINIÓN DE APLICABILIDAD

- El Instrumento cumple con los Requisitos para su aplicación
- El Instrumento no cumple con Los requisitos para su aplicación

X

IV. PROMEDIO DE VALORACIÓN:

90 %

Lima, 17 de junio de 2021



Dr. RUBEN MUNIVE CERRON
CIP N° 38103

VALIDACIÓN DE INSTRUMENTO

V. DATOS GENERALES

- 5.1. Apellidos y Nombres: Munive Cerrón, Rubén Víctor
- 5.2. Cargo e institución donde labora: Docente e Investigador/UCV Lima Norte.....
- 5.3. Nombre del instrumento motivo de evaluación: Ficha de síntesis y recolección de datos específicos de los estudios seleccionados
- 5.4. Autor(A) de Instrumento: Belahonia Talledo, Renato Leonel / García Espejo, Lucero Marielena

VI. ASPECTOS DE VALIDACIÓN

CRITERIOS	INDICADORES	INACEPTABLE						MINIMAMENTE ACEPTABLE			ACEPTABLE			
		40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100
1. CLARIDAD	Esta formulado con lenguaje comprensible.											X		
2. OBJETIVIDAD	Esta adecuado a las leyes y principios científicos.											X		
3. ACTUALIDAD	Esta adecuado a los objetivos y las necesidades reales de la investigación.											X		
4. ORGANIZACIÓN	Existe una organización lógica.											X		
5. SUFICIENCIA	Toma en cuenta los aspectos metodológicos esenciales											X		
6. INTENCIONALIDAD	Esta adecuado para valorar las variables de la Hipótesis.											X		
7. CONSISTENCIA	Se respalda en fundamentos técnicos y/o científicos.											X		
8. COHERENCIA	Existe coherencia entre los problemas objetivos, hipótesis, variables e indicadores.											X		
9. METODOLOGÍA	La estrategia responde una metodología y diseño aplicados para lograr probar las hipótesis.											X		
10. PERTINENCIA	El instrumento muestra la relación entre los componentes de la investigación y su adecuación al Método Científico.											X		

VII. OPINIÓN DE APLICABILIDAD

- El Instrumento cumple con los Requisitos para su aplicación
- El Instrumento no cumple con Los requisitos para su aplicación

X

VIII. PROMEDIO DE VALORACIÓN:

90 %

Lima, 17 de junio de 2021



Dr. RUBEN MUNIVE CERRON
CIP N° 38103

VALIDACIÓN DE INSTRUMENTO

IX. DATOS GENERALES

- 9.1. Apellidos y Nombres: Munive Cerrón, Rubén Víctor
- 9.2. Cargo e institución donde labora: Docente e Investigador/UCV Lima Norte.....
- 9.3. Nombre del instrumento motivo de evaluación: Ficha de parámetros previa y posterior a la aplicación de la técnica de nanoburbujas
- 9.4. Autor(A) de Instrumento: Belahonia Talledo, Renato Leonel / García Espejo, Lucero Marielena

X. ASPECTOS DE VALIDACIÓN

CRITERIOS	INDICADORES	INACEPTABLE					MINIMAMENTE ACEPTABLE			ACEPTABLE				
		40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100
1. CLARIDAD	Esta formulado con lenguaje comprensible.											X		
2. OBJETIVIDAD	Esta adecuado a las leyes y principios científicos.											X		
3. ACTUALIDAD	Esta adecuado a los objetivos y las necesidades reales de la investigación.											X		
4. ORGANIZACIÓN	Existe una organización lógica.											X		
5. SUFICIENCIA	Toma en cuenta los aspectos metodológicos esenciales											X		
6. INTENCIONALIDAD	Esta adecuado para valorar las variables de la Hipótesis.											X		
7. CONSISTENCIA	Se respalda en fundamentos técnicos y/o científicos.											X		
8. COHERENCIA	Existe coherencia entre los problemas objetivos, hipótesis, variables e indicadores.											X		
9. METODOLOGÍA	La estrategia responde una metodología y diseño aplicados para lograr probar las hipótesis.											X		
10. PERTINENCIA	El instrumento muestra la relación entre los componentes de la investigación y su adecuación al Método Científico.											X		

XI. OPINIÓN DE APLICABILIDAD

- El Instrumento cumple con los Requisitos para su aplicación
- El Instrumento no cumple con Los requisitos para su aplicación

X

XII. PROMEDIO DE VALORACIÓN:

90 %

Lima, 17 de junio de 2021



Dr. RUBEN MUNIVE CERRON
CIP N° 38103

VALIDACIÓN DE INSTRUMENTO

I. DATOS GENERALES

- 1.1. Apellidos y Nombres: Vásquez Aranda, Ahuber Omar
- 1.2. Cargo e institución donde labora: Docente/ Universidad Nacional Federico Villarreal
- 1.3. Nombre del instrumento motivo de evaluación: Ficha de síntesis, recolección y selección de estudio para metanálisis ...
- 1.4. Autor(A) de Instrumento: Belahonia Talledo, Renato Leonel / García Espejo, Lucero Marielena

II. ASPECTOS DE VALIDACIÓN

CRITERIOS	INDICADORES	INACEPTABLE						MINIMAMENTE ACEPTABLE			ACEPTABLE			
		40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100
1. CLARIDAD	Esta formulado con lenguaje comprensible.											X		
2. OBJETIVIDAD	Esta adecuado a las leyes y principios científicos.										X			
3. ACTUALIDAD	Esta adecuado a los objetivos y las necesidades reales de la investigación.									X				
4. ORGANIZACIÓN	Existe una organización lógica.										X			
5. SUFICIENCIA	Toma en cuenta los aspectos metodológicos esenciales										X			
6. INTENCIONALIDAD	Esta adecuado para valorar las variables de la Hipótesis.											X		
7. CONSISTENCIA	Se respalda en fundamentos técnicos y/o científicos.											X		
8. COHERENCIA	Existe coherencia entre los problemas objetivos, hipótesis, variables e indicadores.										X			
9. METODOLOGÍA	La estrategia responde una metodología y diseño aplicados para lograr probar las hipótesis.										X			
10. PERTINENCIA	El instrumento muestra la relación entre los componentes de la investigación y su adecuación al Método Científico.									X				

III. OPINIÓN DE APLICABILIDAD

- El Instrumento cumple con los Requisitos para su aplicación
- El Instrumento no cumple con Los requisitos para su aplicación

X

IV. PROMEDIO DE VALORACIÓN:

85%

Lima, 25 de junio de 2021



VALIDACIÓN DE INSTRUMENTO

V. DATOS GENERALES

- 5.1. Apellidos y Nombres: Vásquez Aranda, Ahuber Omar
- 5.2. Cargo e institución donde labora: Docente/ Universidad Nacional Federico Villarreal
- 5.3. Nombre del instrumento motivo de evaluación: Ficha de síntesis y recolección de datos específicos de los estudios seleccionados
- 5.4. Autor(A) de Instrumento: Belahonia Talledo, Renato Leonel / García Espejo, Lucero Marielena

VI. ASPECTOS DE VALIDACIÓN

CRITERIOS	INDICADORES	INACEPTABLE					MINIMAMENTE ACEPTABLE			ACEPTABLE				
		40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100
1. CLARIDAD	Esta formulado con lenguaje comprensible.											X		
2. OBJETIVIDAD	Esta adecuado a las leyes y principios científicos.										X			
3. ACTUALIDAD	Esta adecuado a los objetivos y las necesidades reales de la investigación.									X				
4. ORGANIZACIÓN	Existe una organización lógica.										X			
5. SUFICIENCIA	Toma en cuenta los aspectos metodológicos esenciales										X			
6. INTENCIONALIDAD	Esta adecuado para valorar las variables de la Hipótesis.											X		
7. CONSISTENCIA	Se respalda en fundamentos técnicos y/o científicos.											X		
8. COHERENCIA	Existe coherencia entre los problemas objetivos, hipótesis, variables e indicadores.										X			
9. METODOLOGÍA	La estrategia responde una metodología y diseño aplicados para lograr probar las hipótesis.										X			
10. PERTINENCIA	El instrumento muestra la relación entre los componentes de la investigación y su adecuación al Método Científico.									X				

VII. OPINIÓN DE APLICABILIDAD

- El Instrumento cumple con los Requisitos para su aplicación
- El Instrumento no cumple con Los requisitos para su aplicación

X

VIII. PROMEDIO DE VALORACIÓN:

85%

Lima, 25 de junio de 2021



VALIDACIÓN DE INSTRUMENTO

IX. DATOS GENERALES

- 9.1. Apellidos y Nombres: Vásquez Aranda, Ahuber Omar
- 9.2. Cargo e institución donde labora: Docente/ Universidad Nacional Federico Villarreal
- 9.3. Nombre del instrumento motivo de evaluación: Ficha de parámetros previa y posterior a la aplicación de la técnica de nanoburbujas
- 9.4. Autor(A) de Instrumento: Belahonia Talledo, Renato Leonel / García Espejo, Lucero Marielena

X. ASPECTOS DE VALIDACIÓN

CRITERIOS	INDICADORES	INACEPTABLE						MINIMAMENTE ACEPTABLE			ACEPTABLE			
		40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100
1. CLARIDAD	Esta formulado con lenguaje comprensible.											X		
2. OBJETIVIDAD	Esta adecuado a las leyes y principios científicos.											X		
3. ACTUALIDAD	Esta adecuado a los objetivos y las necesidades reales de la investigación.									X				
4. ORGANIZACIÓN	Existe una organización lógica.											X		
5. SUFICIENCIA	Toma en cuenta los aspectos metodológicos esenciales											X		
6. INTENCIONALIDAD	Esta adecuado para valorar las variables de la Hipótesis.												X	
7. CONSISTENCIA	Se respalda en fundamentos técnicos y/o científicos.												X	
8. COHERENCIA	Existe coherencia entre los problemas objetivos, hipótesis, variables e indicadores.											X		
9. METODOLOGÍA	La estrategia responde una metodología y diseño aplicados para lograr probar las hipótesis.											X		
10. PERTINENCIA	El instrumento muestra la relación entre los componentes de la investigación y su adecuación al Método Científico.									X				

XI. OPINIÓN DE APLICABILIDAD

- El Instrumento cumple con los Requisitos para su aplicación
- El Instrumento no cumple con Los requisitos para su aplicación

X

XII. PROMEDIO DE VALORACIÓN:

85%

Lima, 25 de junio de 2021

