

Identification of non-conventional methods and techniques in drinking water treatment processes

Cornejo García, Marycarmen Juleysy¹; Guerrero Mori, Diego Mauricio²; Pingo Lozada, José Félix³
Sanchez García, Ingrid Estefani⁴

¹Universidad Tecnológica del Perú, Perú, U20303725@utp.edu.pe

²Universidad Tecnológica del Perú, Perú, U20302642@utp.edu.pe

³Universidad Tecnológica del Perú, Perú, C28097@utp.edu.pe

⁴Universidad Tecnológica del Perú, Perú, C25553@utp.edu.pe

Abstract– *In recent years, water quality degradation has become a critical challenge. This problem not only threatens the well-being of millions of individuals, but also endangers biodiversity and the sustainability of sectors such as agriculture and industry. Therefore, the purpose of this research is to examine non-traditional technologies and procedures employed to address the challenges present in drinking water processing. A descriptive design non-experimental approach was used as part of a systematic review without meta-analysis. We relied on the PICO strategy and PRISMA methodology, which allowed us to select 26 articles, following the inclusion and exclusion criteria, published between 2019 and 2024, which were obtained from Scopus, SciELO, Redalyc and EBSCOhost databases. The results highlight key issues such as the need for constant evaluation, the presence of pathogens, turbidity and contamination of emerging components. Also, the alternatives were organized into natural methods, nanotechnology, computational systems and predictive models, disinfection technology, control system and sensitive perception, and water treatment technology. A comparison was made with WHO water quality standards and their impact on both the community and the environment was evaluated. It was concluded that the selection of treatments should be based on the characteristics of the water to be treated for efficient results, and the importance of their implementation for responsible sustainable development was also highlighted.*

Keywords-- *water purification, treatment plant, emerging technology, drinking water.*

Identification of non-conventional methods and techniques in drinking water treatment processes

Cornejo García, Marycarmen Juleysy¹; Guerrero Mori, Diego Mauricio²; Pingo Lozada, José Félix³; Sanchez García, Ingrid Estefani²

¹Universidad Tecnológica del Perú, Perú, U20303725@utp.edu.pe

²Universidad Tecnológica del Perú, Perú, U20302642@utp.edu.pe

³Universidad Tecnológica del Perú, Perú, C28097@utp.edu.pe

⁴Universidad Tecnológica del Perú, Perú, C25553@utp.edu.pe

Resumen- En los últimos años, la degradación de la calidad del agua se ha transformado en un reto crítico. Este problema no solo amenaza el bienestar de millones de individuos, sino que también pone en peligro la biodiversidad y la sostenibilidad de sectores como la agricultura e industria. Por lo tanto, el propósito de esta investigación es examinar las tecnologías y procedimientos no tradicionales empleados para abordar los retos presentes en el procesamiento de agua potable. Se utilizó un enfoque no experimental de diseño descriptivo como parte de una revisión sistemática sin metaanálisis. Nos basamos en la estrategia PICO y la metodología PRISMA, lo que permitió seleccionar 26 artículos, siguiendo los criterios de inclusión y exclusión, publicados entre 2019 y 2024, la cual fueron obtenidos en bases de datos de Scopus, SciELO, Redalyc y EBSCOhost. Los resultados destacan los problemas claves como la necesidad la evaluación constante, la presencia de agentes patógenos, turbidez y la contaminación de componentes emergentes. Asimismo, las alternativas fueron organizados en métodos naturales, nanotecnología, sistemas computacionales y modelos predictivos, tecnología de desinfección, sistema de control y percepción sensible, y tecnología hídrica de tratamientos. Se realizó una comparación con la normativa de calidad del agua según la OMS y se evaluaron su impacto tanto en la comunidad como en el medio ambiente. Se concluyó que la selección de tratamientos debe basarse en las características del agua a tratar para la eficiencia en los resultados, asimismo, también se destaca la importancia de su implementación para un desarrollo sostenible responsable.

Palabras clave: purificación de agua, planta de tratamiento, tecnología emergente, agua potable

I. INTRODUCCIÓN

El agua potable es aquella que, tras someterse a procesos de tratamiento, cumple con las normas de calidad necesarias para ser consumida sin riesgos para la salud. La provisión de agua para consumo es uno de los cimientos esenciales para la salud pública, el crecimiento de la economía y el bienestar global de las comunidades a nivel global. No obstante, en la actualidad, el mundo está lidiando con una crisis de agua nunca vista. Según una recopilación de información, se determinó que antes del año 2030,

únicamente el 81% de la población global podrá acceder a agua potable salubre, un servicio del cual no podrán beneficiarse 1.600 millones de individuos. [1]

Esta situación se ve agravada por diferentes variables como el crecimiento poblacional, la urbanización acelerada, y el cambio climático, que han intensificado la escasez de agua y la polución de este recurso.

El tratamiento de agua potable es una necesidad global para asegurar la provisión para el consumo humano. Pero, en los últimos años se ha presenciado tratamientos inadecuados, la cual, es una problemática crítica, con consecuencias potencialmente graves para la salud pública y el entorno. Según [2] alrededor de 446 000 niños menores de 5 años fallecen a causa de enfermedades diarreicas asociadas a servicios de agua insuficientes, saneamiento e higiene. Este número equivale al 9% de los 5,8 millones de fallecimientos de niños de menos de 5 años. Esta información resalta la urgencia de perfeccionar el servicio de tratamientos de agua potable, con el objetivo de reducir la mortalidad infantil y potenciar la salud pública a nivel mundial.

Si bien los procedimientos convencionales de tratamiento utilizados han sido efectivos para cumplir con las normativas de calidad, no son tan eficaces para eliminar contaminantes emergentes, tales como micro plásticos, productos farmacéuticos, plaguicidas, compuestos químicos orgánicos resistentes, entre otros. Sin embargo, para abordar estos desafíos, es fundamental innovar e implementar nuevas prácticas y procedimientos en los procesos que puedan manejar de manera eficiente la creciente diversidad de contaminantes. Las mejoras deberían no solo cumplir con las normativas actuales, sino también ser sostenibles, rentables y adaptables a diferentes entornos geográficos.

La realización de la presente RSL se justifica por la necesidad de consolidar y analizar la información sobre los avances emergentes centrados en el tratamiento de

potable e identificar información importante para orientar futuras investigaciones. Además, la RSL proporcionó un recurso valioso para diseñar sistemas de tratamiento de agua eficientes y sostenibles, apoyando la mejora continua de los procesos industriales en un contexto donde la calidad y disponibilidad del agua es crítica.

La revisión tiene como finalidad explorar los desafíos y procesos emergentes relacionados con la depuración del agua reservada al consumo por parte de la población, con el objetivo de optimizar la efectividad de la potabilización del recurso hídrico. En este marco, el objetivo es investigar sobre las dificultades asociadas en el procesamiento de agua potable y las soluciones tecnológicas y técnicas no convencionales diseñadas para optimizar resultados en los procesos. De esta manera, se busca incentivar la adopción de estas herramientas emergentes, evaluando su capacidad de solución a los desafíos. Para ello, se ha llevado un análisis minucioso y estructura de las investigaciones existentes, estableciendo una base sólida.

II. METODOLOGÍA

A. Estrategia de Búsqueda

El tratamiento de agua potable es un proceso crítico en la administración de recursos hídricos, y su optimización mediante tecnologías innovadoras es esencial para garantizar la sostenibilidad y eficiencia. Esta investigación tuvo como meta valorar el impacto de la instauración de tecnologías avanzadas en los procesos industriales de tratamiento de agua potable. Para ello, se utilizó la estrategia de búsqueda PICO que permitió identificar y analizar la literatura relevante sobre el tema.

Tabla 1. Tabla Pico

P Problema/ Población	I Intervención	C Comparación	O Resultados
Procesos de tratamiento de agua potable	Tecnologías avanzadas de filtración y desinfección	Métodos tradicionales de tratamiento de agua	Mejora de la calidad de agua y efectividad de tratamientos
P1: ¿Qué tecnologías y métodos avanzados son más efectivos en comparación con los métodos tradicionales para mejorar la calidad del agua tratada en plantas de tratamiento de agua potable? P11: ¿Cuáles son los principales problemas en los procesos en las plantas de tratamiento de agua potable? P12: ¿Qué tecnologías y métodos avanzados se están utilizando actualmente para el tratamiento de agua potable? P13: ¿Los resultados de los tratamientos con métodos no convencionales cumplen con la normativa internacional de la calidad de agua? P14: ¿Qué impacto tienen estas tecnologías en la reducción de contaminantes y en la mejora de la potabilidad del agua?			

B. Ecuaciones de Búsqueda

El uso de esta estrategia nos facilitó la recolección de datos en las bases de prestigio académico al poder proporcionar de manera exacta las palabras clave que nos ayudó a elegir los artículos que estén directamente relacionados con el tema de la presente RSL, a continuación, se mostraran los criterios de la búsqueda:

Tabla 2. Ecuación de Búsqueda

Componente Pico	Términos	Ecuación de búsqueda
P (Problema)	Tratamiento de agua potable, Plantas de tratamiento de agua potable, purificación de agua potable, procesos de potabilización de agua	"Drinking water treatment" OR "drinking water treatment plants" OR "drinking water purification" OR "water purification processes"
I (Intervención)	Tecnología, Filtración de agua potable, Desinfección de agua potable, Contaminantes emergentes en agua potable	technology OR "drinking water filtration" OR "drinking water disinfection" OR "emerging contaminants in drinking water"
C (Comparación)	Métodos, cloración del agua, decantación del agua, coagulación del agua	methods OR "water chlorination" OR "decantation of water" OR "coagulation of water"
O (Resultados)	Calidad de agua potable, efectividad de procesos, optimización de procesos, estándar de calidad	"Drinking water quality" OR "process effectiveness" OR "process optimization" OR "quality standard"
Ecuación general de búsqueda ("Drinking water treatment" or "drinking water treatment plants" or "drinking water purification" or "water purification processes") and (technology or "drinking water filtration" or drinking water disinfection or "emerging contaminants in drinking water") and ("traditional methods" or "water chlorination" or "decantation of water" or "coagulation of water") and ("drinking water quality" or "process effectiveness" or "process optimization" or "quality standard")		

C. Criterios (Inclusión y Exclusión)

Tabla 3. Criterios (Inclusión y Exclusión)

CI	CE

CI4: Investigaciones que aborden tratamientos aplicados a plantas de agua potable.	CE4: Investigaciones con metodologías poco confiables
CI6: Estudios con resultados cuantitativos.	CE5: Investigaciones que excluyen con los estándares internacionales de calidad del agua potable en sus análisis.
CI5: Documentos de acceso abierto.	CE6: Descartar artículos que tengan fecha de publicación menores al 2019

D. Proceso de Selección de estudios

A lo largo de la fase de selección se empleó la estrategia PRISMA el cual nos ayudó a capturar los datos relevantes sobre los procesos industriales en el procesamiento de agua potable, se incluyó el análisis de la implementación de nuevas tecnologías y los logros obtenidos en estos procesos industriales.

El método PRISMA en la presente RSL se reflejó desde los parámetros de inclusión y exclusión hasta el proceso de seleccionar los estudios. Se utilizó las palabras claves y la ecuación de búsqueda generadas por la estrategia PICO, dándonos un total de base de datos de 26 artículos incluidos en la presente revisión: Scopus (n = 13), Redalyc (n = 4), Scielo (n = 3) y EBSCOhost (n = 6).

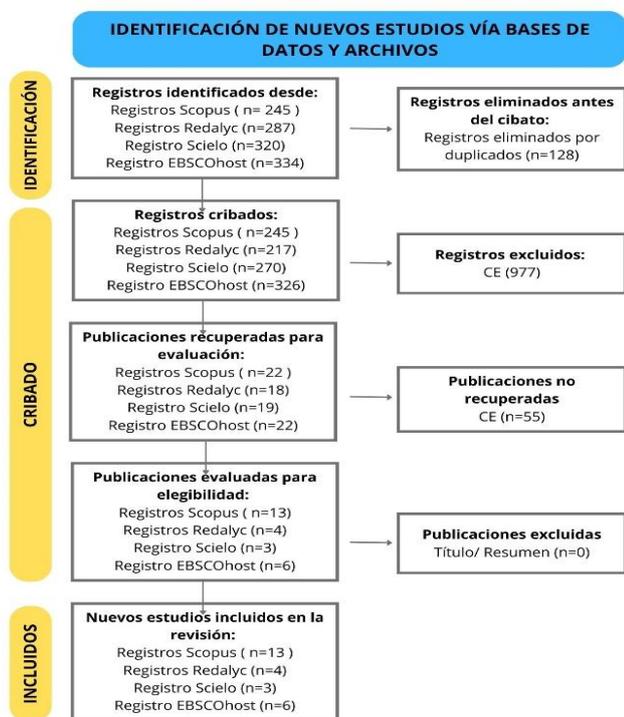


Figura 1. Diagrama Prisma

III. RESULTADOS

Resultados bibliométricos

Tabla 4: Listado de estudios seleccionados durante el periodo 2019-2024

Título	Autor
Solar powered micro plasma-generated ozone: Assessment of a novel point-of-use drinking water treatment method	Dorevitch et al. (2020)
Drinking Water Quality Assessment Using a Fuzzy Inference System Method: A Case Study of Rome (Italy)	Barzegar et al. (2023)
Advances in quantifying microbial contamination in potable water: Potential of fluorescence-based sensor technology	Gunter et al. (2023)
Application of capacitive deionization in drinking water purification	Yu et al. (2024)
Removal of oxidative stress and genotoxic activities during drinking water production by ozonation and granular activated carbon filtration	Yu et al. (2021)
Designing of wireless sensor nodes for providing good quality drinking water to the public	Usha Kumari et al. (2020)
High-Precision Monitoring System for Turbidity of Drinking Water by Using Scattering Method	Chen, Wang X y Wang (2023)
Fungal-derived adsorption membrane to capture potentially toxic elements	French et al. (2024)
Optimization of a hybrid process combining nanofiltration and electrodialysis for the treatment of surface water in the Mekong Delta region	Nguyen et al. (2022)
Effect of ozone–tea polyphenols as a drinking water disinfection process on antibiotic resistance genes	Feng et al. (2022)
Evaluation the effect of some operational conditions on the drinking water quality in reverse osmosis system	Maki y Al-Fatlawi (2023)

Applying bio-slow sand filtration for water treatment	Liu et al. (2019)
Water safety plan enhancements with improved drinking water quality detection techniques	Gunnarsdottir et al. (2020)
Estimación de la producción de lodos en plantas convencionales de tratamiento de agua potable mediante modelos de predicción	Torres, Arango y Torres (2022)
Impacto de los contaminantes emergentes en el entorno acuático y los tratamientos para el control y remoción en los cuerpos hídricos. Revisión literaria	Milquez y Montagut (2023)
Red neuronal artificial para estimar un índice de calidad de agua	Quiñones et al. (2020)
Uso de la cáscara de coco (Cocos nucifera) como medio filtrante en el tratamiento del agua del campo El Salto, Venezuela	Rondón, Castillo y Miranda (2019)
Radiación ultravioleta-c para desinfección bacteriana (coliformes totales y termotolerantes) en el tratamiento de agua potable	Rossel et al. (2020)
Predicción de la Dosis Óptima de Policloruro de Aluminio para el Proceso de Coagulación en el Tratamiento de Agua Potable mediante Redes Neuronales Artificiales	Izquierdo, Pezantes y Ayala (2023)
Diseño e Implementación de un Sistema de Tratamiento para la Remoción de Arsénico del Agua de Consumo en el Altiplano y Valles de Bolivia	Escalera et al. (2020)
Model of a drinking water treatment process and the variables Involved using Coloured Petri Nets	Caratar, Cano y García (2019)
Methodology for the bacteria detection in drinking water through an e-nose and e-tongue	Carrillo, Durán y García (2020)
Nanotechnology for Combating Microbial Contamination of Water	O. do Nascimento et al. (2020)
Caracterización de membranas compuestas por nanofibras de acetato de celulosa preparadas por electrohilado para la retención de micropartículas suspendidas en el agua	Ramírez y Gómez (2019)
Filtro de cascarilla de Ricinus communis y carbón vegetal para tratamiento de agua contaminada con hidrocarburos: diseño de un sistema en serie por etapas.	Velásquez, Jiménez y Curi (2019)

The strategy of nanomaterials in polymeric membranes for water treatment: Nanocomposite membranes	Castro (2020)
---	---------------

Para facilitar una mejor comprensión de la literatura revisada, se ha realizado una categorización de los 26 artículos seleccionados, la cual nos ayudó a identificar patrones en la investigación, como la predominancia de ciertos idiomas o países y los años con mayor volumen de publicaciones.

Este gráfico muestra el porcentaje de artículos publicados, destacando la predominancia del inglés como idioma principal en la difusión de estudios sobre tratamiento de agua potable, lo cual refleja una tendencia global en la investigación científica.

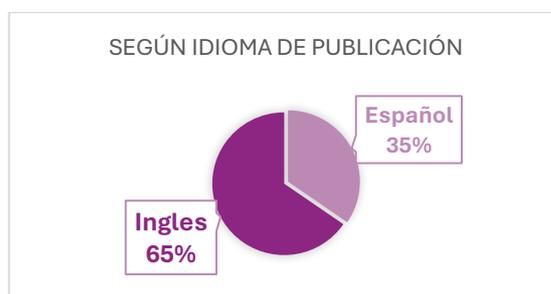


Gráfico 1: Clasificación de los artículos científicos según idioma de publicación

En el siguiente gráfico se categoriza cada artículo según el país donde se realizó la investigación. Este análisis proporciona una visión de los países más activos en la investigación sobre tratamientos

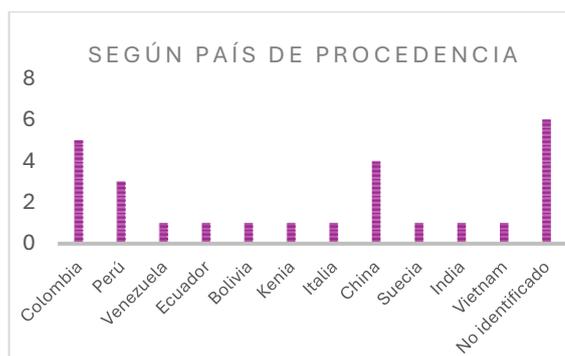


Gráfico 2: Clasificación de los artículos científicos según país de procedencia

Este gráfico organiza los artículos según su año de publicación, permitiendo observar cómo ha evolucionado el interés en este tema a lo largo del tiempo.



Gráfico 3: Clasificación de los artículos científicos según año de publicación

Finalmente, se presenta la clasificación de artículos según la base de datos de la que fueron extraídos: Scopus, EBSCOhost, SciELO y Redalyc. Esto permite visualizar la distribución de las fuentes y la fiabilidad en cuanto a la cobertura del tema teniendo en cuenta la relevancia de cada base de datos.

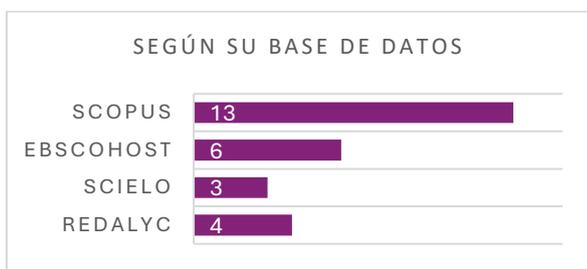


Gráfico 4: Clasificación de los artículos científicos según su base de datos

E. Resultados por contenido

En esta sección se detallan los hallazgos obtenidos de los artículos seleccionados en la revisión sistemática. Dichos resultados se organizaron a fin de responder a las preguntas específicas planteadas en la estrategia PICO. Esta organización permite abordar de manera estructurada cada aspecto clave de la investigación, facilitando una comprensión de la información que se quiso compartir en esta RSL.

¿Cuáles son los principales problemas en los procesos en las plantas de tratamiento de agua potable?

Un reto crucial para las plantas de tratamiento de agua potable es el acelerado incremento en la demanda de agua dulce y en la gestión de aguas residuales, impulsado por el crecimiento poblacional y la industrialización acelerada. Además, cuando las fuentes de agua subterránea se contaminan, su calidad es extremadamente difícil de restaurar, lo cual representa un desafío persistente para las plantas de tratamiento en su misión de garantizar agua y potable [3]

Otro desafío significativo en los procesos es la evaluación constante de su calidad, que sigue representando un obstáculo para las instituciones de salud pública. Uno de los principales indicadores de riesgo sanitario es la bacteria *Escherichia coli*, cuya presencia indica la posibilidad de contaminación fecal y de otros microorganismos patógenos. Actualmente, la detección de *E. coli* en el agua se basa en métodos estandarizados que requieren un tiempo de incubación de entre 24 y 28 horas, además de recursos especializados como reactivos y personal capacitado. El retraso y la dependencia de recursos especializados dificultan el monitoreo en tiempo real de la calidad del agua, lo que representa un obstáculo para gestionar de manera eficaz los riesgos sanitarios en las plantas de tratamiento [4].

Adicionalmente, la polución del agua por hidrocarburos constituye un reto constante en el manejo del agua potable, producto de la significativa dependencia mundial de los productos derivados del petróleo como fuente primordial de energía. El excesivo requerimiento de hidrocarburos implica que la contaminación ocurre con frecuencia, ya sea durante su exploración, producción, mantenimiento, transporte, almacenamiento o incluso en casos de derrames accidentales [5].

Así, podemos tener una clara visión de los problemas existentes en las plantas de tratamiento de agua potable, los problemas externos, como la alta demanda de agua y la contaminación por hidrocarburos, se traducen en desafíos internos significativos para las plantas de tratamiento. La infraestructura puede verse sobrecargada, lo que incrementó los gastos en mantenimiento y reduce la eficiencia operativa. Además, la evaluación de patógenos, como *Escherichia coli*, requiere procesos más rápidos y personal capacitado, limitando la capacidad de respuesta ante emergencias sanitarias. La contaminación por hidrocarburos exige tecnologías avanzadas y personal especializado, incrementando la complejidad del tratamiento. Estos desafíos afectan la calidad del agua y exigen que las plantas inviertan en tecnología y capacitación para garantizar un suministro sostenible.

¿Qué tecnologías y métodos avanzados se están utilizando actualmente para el tratamiento de agua?

La primera categoría presentada en este apartado es la de “Métodos Naturales”. Los métodos naturales han surgido como alternativas sostenibles para el tratamiento de agua potable, aprovechando materiales accesibles y de bajo impacto ambiental. Se investigaron dos técnicas basadas en filtrantes alternativos, donde podemos encontrar filtros con cáscara de coco y los filtros de cascarilla de *Ricinus communis* y carbón vegetal implementan un sistema de

filtración en serie capaces de eliminar hidrocarburos [5] [6]. Otra técnica, la desinfección con ozono y polifenoles del té que mejora la seguridad del agua sin necesidad de químicos [7]. Finalmente, la filtración lenta biológica con arena que es capaz de hacer potable el agua sin necesidad de una desinfección química posterior, lo que lo convierte en una elección rentable y de bajo mantenimiento [8].

La segunda categoría presentada es la de “Nanotecnología Aplicada”. La nanotecnología utilizada en el tratamiento de agua ha permitido el desarrollo de técnicas avanzadas que maximizan la remoción de contaminantes a nivel microscópico, aportando soluciones de alta eficiencia. Entre estas innovaciones, se encuentran las nanopartículas, que funcionan como nano absorbentes incorporados en sensores, filtros y superficies antibacterianas [3]. Otro avance significativo son las nano fibras, que gracias a su estructura minúscula y densa retienen micropartículas suspendidas en el agua [9]. Además, los nanomateriales pueden ofrecer propiedades antibacterianas y filtros de alta precisión para contaminante [10]. También se destaca la membrana de adsorción derivada de hongos que logra eliminar elementos tóxicos [11]

La tercera categoría presentada es la de “Sistemas Computacionales y Modelos Predictivos”. Estas alternativas están revolucionando el tratamiento de agua potable al permitir un control avanzado y una predicción precisa de las variables que contribuyen en la calidad del agua. Uno de estos métodos es la predicción de lodo, que es utilizada para estimar de forma anticipada la producción de lodos durante el proceso de sedimentación [12] Otra técnica es el uso de redes neuronales artificiales que optimizan la dosificación de productos químicos el proceso de coagulación [13]. Otro enfoque innovador es el uso de redes de Petri coloreadas, que permite la evaluación y ajuste de variables en función de patrones estacionales [14]. También los sistemas de inferencia difusa, que emplean modelos matemáticos basados en lógica difusa mejorando la toma de decisiones en el tratamiento [15]. Por último, no podemos obviar los métodos moleculares que permiten la detección rápida y confiable de algunos de los patógenos [16]

La cuarta categoría presentada es la de “Sistemas de Desinfección Avanzados”. La primera técnica que podemos incluir es el uso de la radiación ultravioleta (UV), es una técnica común en esta categoría que actúa al eliminar bacterias mediante radiación [17]. Otra técnica utilizada es el uso de ozono generado con micro plasma es un desinfectante potente [18] Finalmente, la desinfección por campos eléctricos pulsados combina iones de plata con un sistema de filtración por ósmosis inversa para neutralizar

patógenos, lo que representa una solución segura y sostenible para el tratamiento en puntos de uso [19]

La quinta categoría presentada es la de “Sistemas de Control y Percepción Sensible”. Uno de estos métodos es el sistema de percepción sensorial para detectar y diferenciar bacterias como E. coli [4]. Las redes de sensores inalámbricos también destacan en esta categoría para crear zonas de monitoreo en las que se realiza un seguimiento continuo de las características del recurso hídrico [20]. Además, también se está utilizando el sistema de monitoreo de alta precisión de la turbidez que se basa en un método de dispersión óptica [21] Otro enfoque innovador es la fluorescencia, utilizada como un sistema sensorial para la cuantificación de contaminación microbiológica [22].

La última categoría presentada es la de “Tecnologías Híbridas de Tratamiento”. Un ejemplo clave en esta categoría es la ozonización en combinación con filtración de carbón activado granular, utilizada para eliminar el estrés oxidativo [23]. Otro desarrollo híbrido es el sistema diseñado para eliminar el arsénico, conocido como el proceso RAOS (Remoción de Arsénico de Fuentes Oxidadas) [24]. También se destaca la optimización de un proceso híbrido que a través de membranas de intercambio iónico logra una purificación avanzada [25]. Por último, también se presenta la deionización capacitiva el cual es un proceso de eliminación de iones mediante electrosorción [26]

Tabla 5: Cantidad de técnicas y métodos según categoría

Cantidad de técnicas y métodos según categoría	
Métodos Naturales	4
Nanotecnología Aplicada	4
Sistemas Computacionales y Modelos Predictivos	6
Tecnologías de Desinfección	3
Sistemas de Control y Percepción Sensible	4
Tecnologías Híbridas de Tratamiento	4

¿Los resultados de los tratamientos con métodos no convencionales cumplen con la normativa internacional de la calidad de agua?

La técnica inicial que permite una comparación entre el estado del agua antes y después del tratamiento es la predicción del lodo. Este método, fundamentado en el análisis de parámetros como turbiedad y el tono visible del agua en sus fases de crudo, clarificación y filtrado, demuestra que la sedimentación en las plantas de tratamiento tradicionales conserva la mayoría de los sólidos suspendidos. En un estudio de seguimiento de tres años, se

observó que los datos mínimos que se obtuvieron promediaban los 0.28 NTU (Unidades Nefelométricas de Turbidez) [12] Por ende, podemos afirmar que, en los tres años, tanto los valores promedio como los máximos de turbidez para el agua tratada están por debajo del límite de 4.0 NTU que es lo máximo que exige la normativa internacional [27]. Esto indica que la técnica de tratamiento cumple en términos de turbidez y, por lo tanto, es adecuada para reducir los sólidos suspendidos a niveles seguros para el consumo humano.

Tabla 6: Tabla de valores promedio de los máximos de turbidez

Variable	Estadística Descriptiva	Agua Cruda			Agua Clarificada			Agua Tratada		
		Año 1	Año 2	Año 3	Año 1	Año 2	Año 3	Año 1	Año 2	Año 3
Turbiedad (UTN)	Mínimo	1.24	1.4	1.4	1.03	1.22	0.84	0.16	0.36	0.33
	Máximo	172.74	71.12	22.39	2.64	2.83	3.38	2.23	1.73	1.09
	Promedio	30.88	10.57	4.54	1.64	1.73	1.72	0.46	0.61	0.65
	Desviación	33.97	13.15	4.45	0.41	0.41	0.62	0.3	0.22	0.21
	CV (%)	110.01	124.41	98.02	25	23.7	36.05	65.22	36.07	32.31
Color Aparente (UPtCo)	Mínimo	8.98	12	9	3.3	4.38	3.86	1.53	2	1.98
	Máximo	171.93	95.69	47.21	11.5	14.96	14.45	5.6	8.73	7
	Promedio	40.49	25.67	19.66	5.67	9.11	9.61	2.42	4.26	4.31
	Desviación	30.91	15.43	8.96	2.03	3.49	3.77	0.84	2.33	1.52
	CV (%)	76.34	60.11	45.57	35.8	38.31	39.23	34.71	54.69	35.27
pH	Mínimo	6.44	7.35	7.55	6.42	6.56	5.39	5.57	6.81	6.84
	Máximo	11.77	11.43	7.77	8.44	8.34	8.76	7.43	7.56	7.76
	Moda	7.63	7.73	7.68	6.97	7.26	7.23	6.91	7.15	7.17
	Desviación	0.8	0.56	0.06	0.36	0.41	0.56	0.29	0.24	0.19
	CV (%)	10.44	7.27	0.78	5.16	5.65	7.8	4.19	3.36	2.64
Alcalinidad (mg/L)	Mínimo	27.47	27.31	33.11	No hay datos reportados			18.46	17	22.33
	Máximo	53.23	57.65	53.23	No hay datos reportados			48.72	55.95	45.15
	Promedio	39.43	42.1	42.47	No hay datos reportados			30.27	34.04	34.87
	Desviación	6.97	7.71	5.19	No hay datos reportados			8.08	10.65	6.11
	CV (%)	17.68	18.31	12.22	No hay datos reportados			26.69	31.29	17.52

Fuente: Estadística descriptiva de variables fisicoquímicas [12]

El segundo método es un sistema diseñado para la eliminación de arsénico. Según los resultados obtenidos, este método logró disminuir los niveles de arsénico total en aguas subterráneas de Bolivia a menos de 10 µg/L (0.01 mg/L). Este valor cumple con el límite establecido tanto por la Organización Mundial de la Salud [24] que recomienda que el arsénico en el agua potable no exceda los 0.01 mg/L para prevenir riesgos de salud[27]

Los sistemas de percepción sensorial también muestran una comparación. En cuanto a la detección de Escherichia coli, los sistemas sensoriales como el *e-nose* y el *e-tongue* mostraron una notable precisión al identificar esta bacteria en muestras de agua. A partir de un enfoque microbiológico, en las plantas de tratamiento el agua entra con una cantidad de E. coli superior a 100 UFC / ml, después del sedimentador la carga de la bacteria disminuye entre 5 y 10 veces y finalmente, el agua a la salida de la planta no presenta E. coli viable en 100 ml de agua [4] como exige la normativa, la cual demanda menos de 1 coliforme fecal por 100 mL en el agua potable [27]

La siguiente técnica de la cuales podemos inferir una comparación es el uso de ozono generado con microplasma y energía solar demostró una efectividad considerable en el decrecimiento de la concentración de E. coli y en la disminución de la turbidez en agua contaminada. Al comienzo del estudio en el río Kisian, la concentración de E. coli en las muestras fue de 4426,4 NMP/100 mL y la

turbidez alcanzaba los 109,0 NTU. En comparación con el estado inicial, se logró una reducción hasta 1,64 coliformes fecales [18] Podemos decir que, aunque la reducción es notable es aguas con alta contaminación, no cumple con la normativa de 1 coliforme fecal por 100ml [27] pero aun así se podría usar como técnica inicial y combinarla con otra técnica de desinfección.

Por otro lado, el tratamiento combinado de ozonización y filtración con carbón activado granular (GAC) ha mostrado ser altamente eficaz en la reducción bioactividades hormonales en el agua. Además, en el agua cruda antes del tratamiento se detectó un pH a fuera del rango aceptable. Después del tratamiento la muestra se encontró ajustado a un rango de 6.5 a 8.5 [23], que cumpliría con el rango exigido por la normativa internacional para evitar la corrosión de las tuberías y garantizar la potabilidad del agua[27], Además, se detectaron actividades de Nrg2 que estaban por encima de los niveles de corte establecidos, sin embargo después de la aplicación de la ozonización se observó una reducción de hasta 12 veces y una reducción de 7 veces después de la filtración con GAC. El estudio indica que las muestras de agua tratada mostraban actividades por debajo de los niveles de corte, lo cual podría considerarse conforme a las normativas de calidad de agua [23]

Por último, tenemos la técnica de desinfección con ozono y polifenoles de té, para el cual se detectaron un total de 220 ARG en muestras de agua cruda, es decir que se encontraron genes de distintos tipos que son resistentes a grupos de antibióticos. Los resultados obtenidos después del tratamiento de desinfección con ozono y polifenoles de té pueden minimizar el número y los tipos de ARG encontrados. Este proceso tiene la posibilidad de eliminar los 20 ARG más grandes en el agua sin procesar con una tasa de eliminación del 56,5% [7] De esto podemos inferir que el proceso de desinfección puede mejorar notablemente la calidad de agua previo al tratamiento y puede usarse con agua que contenga más genes resistentes a los antibióticos.

¿Qué impacto tienen estas tecnologías en la comunidad y el medio ambiente?

Se ha demostrado que el uso de estas tecnologías y métodos en el tratamiento del agua potable es eficaz para reducir los contaminantes y tiene un efecto positivo crucial en el ambiente. Las redes neuronales artificiales han sido identificadas como un potente mecanismo para pronosticar y determinar el indicador de calidad del agua en el río Utcubamba

La utilización de un medio filtrante hecho de cáscara de coco ha dado como resultado una disminución del contenido

de aceite en el agua más allá del límite establecido por la normativa vigente. Además, la granulometría de 2 mm ha demostrado ser la más efectiva y menos costosa comparación con los medios filtrantes convencionales [6].

También se ha demostrado que la predicción de la cantidad ideal de policloruro de aluminio a través de redes neuronales artificiales es una alternativa alentadora para las compañías especializadas en el tratamiento del agua potable [13]. Este sistema puede satisfacer la creciente demanda de tecnologías automáticas e inteligentes en los procesos industriales.

El sistema RAOS para la remoción de arsénico ha sido capaz de reducir las concentraciones de este contaminante a niveles inferiores a los requeridos por la OMS y la normativa boliviana en diversas localidades [24] demostrando su eficacia técnica en la remoción de arsénico en aguas del subsuelo.

Finalmente, se ha demostrado que las membranas hechas de nanofibras de acetato de celulosa poseen un enorme potencial en la microfiltración del agua. La estructura de las fibras facilita la captura de partículas en el agua utilizada [9], lo que indica su utilidad en tecnologías de filtrado de agua.

Habiendo ya enfatizado en el impacto que han tenido las técnicas seleccionadas tanto en el medio ambiente como en la comunidad y reducción de residuos se puede finalizar este apartado concluyendo que las técnicas avanzadas para el tratamiento de agua, presentan un potencial positivamente significativo.

IV. DISCUSIÓN

En esta investigación y gracias a los artículos científicos indagados podemos identificar los principales problemas en las plantas de tratamiento, que comprenden factores que afectan a la población mundial como la demanda creciente de este recurso, que provoca la necesidad de una rápida evolución en los procesos de tratamiento [3] o la contaminación con hidrocarburos a causa del crecimiento de la industrialización. Sin embargo, los tratamientos no convencionales investigados se centran en otro problema común el cual es el riesgo sanitario por la presencia de microorganismos como bacterias o la E. Coli [4], por lo tanto, se puede inferir que la problemática principal en la cual se centran los tratamientos investigados es la necesidad de eliminar la existencia de microorganismos para cumplir con las normas internacionales de saneamiento y calidad. Con base en los métodos analizados y conociendo la problemática principal, podemos inferir que la combinación de ozonización y filtración con carbón activado granular

(GAC) se posiciona como el más eficaz, ajustando parámetros como el pH dentro del rango aceptable (6.5-8.5) y reduciendo bioactividades hormonales y actividades Nrg2 hasta 12 y 7. veces, respectivamente, en comparación con el agua cruda [24]. Además, este método cumple con los estándares internacionales, consolidándose como una solución integral. En contraste, otros métodos presentan enfoques más específicos: la predicción de lodo es eficiente en la reducción de turbidez, pero no abarca contaminantes químicos o biológicos [13]; la remoción de arsénico es limitada a este elemento [25]; y las nanopartículas de adsorción se centran en detectar iones de mercurio [4]. Aunque la ozonización con microplasma reduce significativamente las bacterias, no alcanza el estándar para coliformes fecales en agua potable [19]. Por ello, la combinación de ozonización y GAC resalta como una tecnología integral, eficiente y adaptable para asegurar la calidad del agua potable. Finalmente, estas tecnologías y métodos tienen un impacto significativo tanto en la comunidad como en el medio ambiente. Desde materiales accesibles como los filtros de cáscara de coco, que reducen aceites en el agua [7], hasta membranas de nanofibras aplicadas en filtración avanzada [10], las soluciones analizadas no solo mejoran la calidad del agua, sino que también disminuyen costos y residuos. Este enfoque, que combina innovación tecnológica con sostenibilidad, sienta las bases para una gestión responsable del recurso hídrico, garantizando su disponibilidad para generaciones futuras.

V. CONCLUSIÓN

La presente investigación logró identificar tecnologías y técnicas innovadoras para resolver los problemas con la depuración del agua contaminada. Entre las alternativas se destacaron los métodos naturales, la nanotecnología, sistemas computacionales y modelos predictivos, tecnología de desinfección, sistema de control y percepción sensible, así como tecnología hídrica de tratamientos. Los resultados indicaron que la mejor técnica para reducir la turbidez es la de predicción de lodo, la cual alcanzó el 7% del límite máximo establecido por la norma de calidad de agua de la OMS. De igual modo, el tratamiento de ozonización y filtración con carbón activado granular demostró que puede reducir 12 y 7 veces los contaminantes emergentes respectivamente, que origina las bioactividades hormonales en el agua. Asimismo, se ha concluido que la selección de la alternativa de tratamiento debe considerar las propiedades fisicoquímicas del agua a tratar, como la turbidez, los niveles de agentes patógenos y la presencia de contaminantes emergentes. Además de los avances tecnológicos, en los hallazgos se ha evidenciado prácticas

sostenibles que son importantes para promover un crecimiento sustentable y responsable con el entorno natural. Esta investigación resalta la importancia de adaptar las tecnología y técnicas estudiadas para superar los desafíos actuales y que el elemento hídrico sea de excelente calidad, tanto para su uso domiciliario, comercial e industrial, sin perjudicar a las futuras generaciones.

Sin embargo, los artículos analizados presentaron limitaciones, como datos a gran escalas y evaluaciones de costo-beneficio de la aplicación de las alternativas de solución. Para futuros investigaciones, se recomienda centrarse en modelos con técnicas hídricas que faciliten la implementación, la aplicación y monitoreo en tiempo real y continuo adaptables a comunidades.

AGRADECIMIENTO/RECONOCIMIENTO

Queremos expresar nuestro más profundo agradecimiento a nuestros docentes del curso de Formación para la Investigación Industrial por su guía y valiosos consejos. Asimismo, extendemos nuestra gratitud a la Universidad Tecnológica del Perú por brindarnos las herramientas y el acceso a bases de datos académicas. De manera especial, agradecemos a nuestra familia y amigos por su apoyo constante durante el desarrollo de este proyecto quienes con su motivación y confianza nos impulsaron a seguir adelante y culminar este trabajo con dedicación

REFERENCIAS

- [1] UNICEF, “Miles de millones de personas se quedarán sin acceso a servicios de agua potable, saneamiento e higiene antes de 2030 a menos que el progreso se multiplique por cuatro, advierten la OMS y UNICEF”, UNICEF.
- [2] Grupo Banco Mundial, “Panorama General: Agua”, Grupo Banco Mundial .
- [3] R. O. do Nascimento, I. Gupta, M. Parsapour, A. P. Ingle, y M. Rai, “Nanotechnology for Combating Microbial Contamination of Water”, *Revista de la Asociación Colombiana de Ciencias Biológicas*, pp. 42–62, sep. 2020, doi: 10.47499/revistaacsb.v1i32.205.
- [4] J. K. Carrillo Gómez, C. M. Durán Acevedo, y R. O. García-Rico, “Methodology for the bacteria detection in drinking water through an e-nose and e-tongue”, *Inge CuC*, vol. 17, núm. 1, pp. 165–176, ene. 2021, doi: 10.17981/ingecuc.17.1.2021.13.
- [5] T. D. Marín Velásquez, V. I. Heredia-Jiménez, y M. Alcarraz-Curi, “Filtro de cascarilla de *Ricinus communis* y carbón vegetal para tratamiento de agua contaminada con hidrocarburos: diseño de un sistema en serie por etapas”, *Ingeniería del agua*, vol. 23, núm. 3, p. 187, jul. 2019, doi: 10.4995/ia.2019.11426.
- [6] A. Y. Rondón Perdomo, L. A. Castillo Campos, y J. Miranda, “Uso de la cáscara de coco (*Cocos nucifera*) como medio filtrante en el tratamiento del agua del campo El Salto, Venezuela”, *Ingeniería y Desarrollo*, vol. 38, núm. 1, pp. 125–147, ene. 2021, doi: 10.14482/inde.38.1.628.16.
- [7] C. M. Feng, H. Y. Yu, T. Wang, J. Li, L. H. Sun, y X. C. Tao, “Effect of ozone–tea polyphenols as a drinking water disinfection process on antibiotic resistance genes”, *Aqua Water Infrastructure, Ecosystems and Society*, vol. 71, núm. 4, pp. 507–517, abr. 2022, doi: 10.2166/aqua.2022.147.
- [8] L. Liu *et al.*, “Applying bio-slow sand filtration for water treatment”, *Pol J Environ Stud*, vol. 28, núm. 4, pp. 2243–2251, 2019, doi: 10.15244/pjoes/89544.
- [9] W. Cárdenas, E. Y. Gómez-Pachon, E. Muñoz, y R. Vera-Graziano, “Caracterización de membranas compuestas por nanofibras de acetato de celulosa preparadas por electrohilado para la retención de micropartículas suspendidas en el agua”, en *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Institute of Physics Publishing, jul. 2016. doi: 10.1088/1757-899X/138/1/012001.
- [10] R. Castro-Muñoz, “The strategy of nanomaterials in polymeric membranes for water treatment: Nanocomposite membranes”, *Tecnología y Ciencias del Agua*, vol. 11, núm. 1, pp. 410–436, 2020, doi: 10.24850/j-tyca-2020-01-11.
- [11] V. French *et al.*, “Fungal-derived adsorption membrane to capture potentially toxic elements”, *Chemical Engineering Journal*, vol. 488, may 2024, doi: 10.1016/j.cej.2024.151028.
- [12] P. Torres-Lozada, L. A. Arango-Vallejo, y W. A. Torres-López, “Estimación de la producción de lodos en plantas convencionales de tratamiento de agua potable mediante modelos de predicción”, *Revista UIS Ingenierías*, vol. 21, núm. 4, dic. 2022, doi: 10.18273/revuin.v21n4-2022008.
- [13] C. Izquierdo, B. Pezántes, y E. Ayala, “Prediction of the Optimal Dosage of Poly Aluminum Chloride for Coagulation in Drinking Water Treatment using Artificial Neural Networks”, *Revista Técnica “energía”*, vol. 20, núm. 1, pp. 93–99, jul. 2023, doi: 10.37116/revistaenergia.v20.n1.2023.562.
- [14] J. F. Caratar, R. E. Cano, y J. I. García, “Model of a drinking water treatment process and the variables involved using Coloured Petri Nets Modelado de un proceso de tratamiento de agua potable y las variables involucradas utilizando Redes de Petri Coloreadas”, 2020.
- [15] Y. Barzegar, I. Gorelova, F. Bellini, y F. D’Ascenzo, “Drinking Water Quality Assessment Using a Fuzzy Inference System Method: A Case Study of Rome (Italy)”, *Int J Environ Res Public Health*, vol. 20, núm. 15, 2023, doi: 10.3390/ijerph20156522.
- [16] M. J. Gunnarsdóttir *et al.*, “Water safety plan enhancements with improved drinking water quality detection techniques”, *Science of the Total Environment*, vol. 698, 2020, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.134185.
- [17] L. J. Rossel Bernedo y F. P. Ferro Mayhua, “Radiación ultravioleta-c para desinfección bacteriana (coliformes totales y termotolerantes) en el tratamiento de agua potable”, *Revista de Investigaciones Altoandinas - Journal of High Andean Research*, vol. 22, núm. 1, pp. 68–77, ene. 2020, doi: 10.18271/ria.2020.537.

- [18] S. Dorevitch *et al.*, “Solar powered microplasma-generated ozone: Assessment of a novel point-of-use drinking water treatment method”, *Int J Environ Res Public Health*, vol. 17, núm. 6, 2020, doi: 10.3390/ijerph17061858.
- [19] K. L. Maki y A. H. Al-Fatlawi, “Evaluation the effect of some operational conditions on the drinking water quality in reverse osmosis system”, *Mater Today Proc*, vol. 80, 2023, doi: 10.1016/j.matpr.2021.07.398.
- [20] C. Usha Kumari, E. Laxmi Lydia, A. Sampath Dakshina Murthy, y M. N. V. S. S. Kumar, “Designing of wireless sensor nodes for providing good quality drinking water to the public”, *Mater Today Proc*, vol. 33, pp. 4250–4254, ene. 2020, doi: 10.1016/J.MATPR.2020.07.352.
- [21] K. Chen, X. Wang, y C. Wang, “High-Precision Monitoring System for Turbidity of Drinking Water by Using Scattering Method”, *IEEE Sens J*, vol. 23, núm. 23, pp. 29525–29535, dic. 2023, doi: 10.1109/JSEN.2023.3326550.
- [22] H. Gunter, C. Bradley, D. M. Hannah, S. Manaseki-Holland, R. Stevens, y K. Khamis, “Advances in quantifying microbial contamination in potable water: Potential of fluorescence-based sensor technology”, 2023. doi: 10.1002/wat2.1622.
- [23] M. Yu, E. Lavonen, A. Oskarsson, y J. Lundqvist, “Removal of oxidative stress and genotoxic activities during drinking water production by ozonation and granular activated carbon filtration”, *Environ Sci Eur*, vol. 33, núm. 1, dic. 2021, doi: 10.1186/s12302-021-00567-y.
- [24] R. Escalera *et al.*, “DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE TRATAMIENTO PARA LA REMOCIÓN DE ARSÉNICO DEL AGUA DE CONSUMO EN EL ALTIPLANO Y VALLES DE BOLIVIA”, *INVESTIGACION & DESARROLLO*, vol. 20, núm. 1, pp. 23–39, jul. 2020, doi: 10.23881/idupbo.020.1-2i.
- [25] L. D. Nguyen, M. A. Kammoun, M. Q. Bui, P. Sifat, A. Deratani, y F. Zaviska, “Optimization of a hybrid process combining nanofiltration and electrodialysis for the treatment of surface water in the Mekong Delta region”, *J Clean Prod*, vol. 365, 2022, doi: 10.1016/j.jclepro.2022.132694.
- [26] F. Yu, Y. Yang, X. Zhang, y J. Ma, “Application of capacitive deionization in drinking water purification”, *Sep Purif Technol*, vol. 354, p. 129285, feb. 2025, doi: 10.1016/J.SEPPUR.2024.129285.
- [27] “Fourth edition incorporating the first and second addenda Guidelines for drinking-water quality”.