



**Ozonización como tratamiento para la integración de aguas residuales domésticas en sectores
agrícolas**

Juliana Andrea Usma Higueta

Daniel Zapata Agudelo

Monografía presentada para optar al título de Especialista en Manejo y Gestión del Agua

Asesor

Darío Naranjo Fernández, Doctor (PhD) en Ingeniería Hidráulica y Saneamiento

Universidad de Antioquia

Facultad de Ingeniería

Especialización en Manejo y Gestión del Agua

Medellín, Antioquia, Colombia

2023

Cita	(Usma Higuita & Zapata Agudelo, 2022)
Referencia	Usma Higuita, J. & Zapata Agudelo, D. (2022). <i>Ozonización como tratamiento para la integración de aguas residuales domésticas en sectores agrícolas</i> [Trabajo de grado especialización]. Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia.
Estilo APA 7 (2020)	



Especialización en Manejo y Gestión del Agua, Cohorte XI.



Biblioteca Carlos Gaviria Díaz

Repositorio Institucional: <http://bibliotecadigital.udea.edu.co>

Universidad de Antioquia - www.udea.edu.co

Rector: John Jairo Arboleda Céspedes

Decano: Jesús Francisco Vargas Bonilla

Jefe departamento: Diana Catalina Rodríguez Loiza

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

1 RESUMEN

La agricultura demanda aproximadamente un 70% de agua a nivel mundial y se estima que la demanda de este recurso continuará aumentando debido al crecimiento poblacional y de las actividades industriales. Por esta razón, se ha buscado alternativas para mejorar la gestión del agua como, por ejemplo, el reúso de las aguas residuales para el riego de cultivos, logrando así disminuir la presión hídrica que genera este sector. El uso del ozono como metodología de tratamiento terciario de aguas residuales domésticas ha demostrado tener una buena eficiencia en la eliminación de patógenos y menor generación de residuos tóxicos en comparación con otros tratamientos. Por tal razón por medio de este trabajo se realizó el análisis de la normatividad nacional e internacional regulatoria del reúso de aguas residuales, se realizó revisión bibliográfica y análisis bibliométricos de los principales métodos de desinfección de aguas residuales enfatizando en la aplicación del ozono, para finalmente integrar todos estos elementos en un esquema metodológico que permite comprender los principales factores a tener en cuenta para la implementación del proceso de la ozonificación como post tratamiento de las aguas residuales con fines de reúso en el sector agrícola, y así evidenciar la importancia de la articulación de las condiciones específicas del sitio, los sistemas de tratamientos aplicados, la normatividad y la relación costo beneficio para llevar a cabo de forma satisfactoria un proyecto de ozonización destinado al reúso de aguas residuales domésticas.

Palabras clave: agua residual doméstica, reúso, ozono, riego agrícola.

2 INTRODUCCIÓN

La problemática de contaminación del agua, combinado con la escasez de esta, ha llevado a un cambio en el contexto ambiental donde se posicionan las aguas residuales como un “recurso” y no como un problema a tratar. En el 2018 el Banco Mundial lanzó la iniciativa “Agua Residual: De residuo a recurso cambiando paradigmas para intervenciones más inteligentes para la gestión de aguas residuales en América Latina y el Caribe”, con el objetivo de integrar el tratamiento de aguas residuales dentro de la economía circular, convirtiéndose estas en una fuente alternativa de abastecimiento de agua económicamente eficiente, sostenible, y fiable para diversos fines sociales y económicos; puesto que del agua residual tratada se puede extraer energía, agua limpia, nutrientes y fertilizantes, promoviendo el cumplimiento de los objetivos de desarrollo sostenible (ODS) (Rodríguez et al., 2020).

Uno de los sectores que genera mayor demanda o presión hídrica es el agrícola, consume alrededor del 70% de agua dulce a nivel mundial (FAO, 2017). Se prevé un aumento en la demanda relacionado con el aumento en la población y a su vez de alimentos, por lo que se ha comenzado a evaluar soluciones sostenibles con la gestión de aguas residuales tratadas como fuentes para el riego de los cultivos (Amori et al., 2022). En Colombia el sector agrícola tiene una participación aproximada del 54% en la demanda hídrica del país, lo cual implica aproximadamente un gasto total de 19.386 Mm³ de agua, seguido del sector de energía y sector doméstico con una participación de 19,4% y 7,3% respectivamente (IDEAM, 2010) (IDEAM, 2018).

El agua residual reusada puede ser valorada como una alternativa rentable y fiable en este sector, ya que puede producirse en grandes volúmenes, contiene alta concentración de nutrientes lo que disminuye el uso de fertilizantes, además mitiga la falta del recurso en áreas con un estrés hídrico extremadamente alto por su demanda. En respuesta a esto muchos países como Israel, Singapur y Australia han adoptado programas de recuperación de agua a través del reusó de estas; Israel reutiliza el 87% de sus aguas residuales tratadas para la agricultura, el 40% de las necesidades de Singapur se satisfacen a través de esta alternativa y Australia el 11,5 % de sus aguas residuales tratadas las destina para ello (Savchenko et al., 2019).

Cabe resaltar que los tratamientos convencionales de aguas residuales no siempre producen agua apta para el riego, puesto que contienen gran cantidad de organismos patógenos, siendo el parámetro microbiológico crucial en la regulación del reuso de agua. En la agricultura, los cultivos hortícolas son los más vulnerables a la contaminación microbiana, especialmente cuando se consumen frescos, por lo tanto,

requieren estrictos controles de efluentes para evitar riesgos en la salud pública (Martínez et al., 2011; Farhadkhani et al., 2018).

De igual forma, existe una variedad de contaminantes químicos que persisten después del tratamiento que incluyen compuestos inorgánicos, metales pesados, pesticidas, contaminantes emergentes, antibióticos favoreciendo la resistencia microbiana (Rizzo et al., 2014). Por tal razón se han estudiado e implementado una serie de tratamientos que permitan producir aguas residuales para prácticas de reutilización seguras y sostenibles en la agricultura como lo son: ozonización, adsorción sobre carbón activado, oxidantes/desinfectantes químicos, radiación UV y filtración por membrana (Rizzo et al., 2020). Se han utilizado diversas tecnologías en el reúso de aguas residuales en riego, enfocadas principalmente a la desinfección de patógenos y a la oxidación de contaminantes emergentes a partir de aguas residuales domésticas o urbanas. La cloración es uno de los métodos más comunes de desinfección sin embargo puede formar subproductos tóxicos como trihalometanos que son cancerígenos y mutagénicos (Mayra Bataller, 2010). Además, se ha encontrado que su capacidad desinfectante no es totalmente eficiente con ciertos microorganismos, puesto que, a bajas dosis, protozoos como *Cryptosporidium parvum* son resistentes (Dong et al., 2017; Leonel & Tonetti, 2021).

La radiación UV puede dañar el ADN, dando como resultado la inhibición de la replicación celular y, en caso de dosis letales, la pérdida de la capacidad de reproducción. La efectividad de un sistema de desinfección UV depende de las características de las aguas residuales, el tipo de microorganismo, la configuración del reactor y la turbidez del agua. Los últimos mencionados pueden reducir drásticamente la eficacia del UV, por lo que en algunos casos se debe utilizar filtración previa a la radiación, lo que lleva a un aumento en costos (Rizzo et al., 2020). Otras metodologías interesantes han sido los procesos de filtración como la ultrafiltración, nanofiltración y osmosis inversa, los cuales pueden remover patógenos y contaminantes emergentes, pero en general son métodos de separación y generan rechazos concentrados (para el caso de la osmosis inversa) por lo que se debe implementar un adecuado proceso de disposición (Rizzo et al., 2014).

Los tratamientos con ozono para el reúso de las aguas residuales tratadas en el sector agrícola han demostrado una disminución en patógenos del 89%, manteniendo la remoción de DQO y DBO entre el 88% y 68% respectivamente (Martínez et al., 2011). Se han evidenciado efectos en una serie de microorganismos críticos como el virus Norwalk, poliovirus, *Escherichia coli* e incluso *C. parvum* resistente al cloro (Leonel & Tonetti, 2021). Reportes indican que el ozono produce menos contaminantes y oxida de una manera más rápida y eficiente, donde la dosis de ozono necesaria para que la reducción de estos patógenos está relacionada con el tipo de efluente, su origen y el nivel de desinfección que se desea, esta

oscila entre 5 a 15 mg O₃/L con un ozono residual menor 0,4 mg O₃/L (Martínez et al., 2011). Además de su importante capacidad de oxidar contaminantes, permite mantener las concentraciones de nitrógeno y fósforo durante su proceso, los cuales son particularmente valiosos en el sector agrícola pues reducen potencialmente la necesidad de adicionar fertilizantes.

Alrededor de estos puntos se ha generado la investigación, evaluación y aplicabilidad del ozono como tratamiento terciario en el agua residual y lograr su reúso que permitan el aprovechamiento adecuado del recurso puesto que a través del tiempo aumenta la presión hídrica debida a diferentes actividades humanas. Por tal razón, el presente trabajo busca realizar una revisión bibliográfica sobre la aplicación del ozono como post tratamiento de las aguas residuales que serán destinadas a reúso en el sector agrícola, por medio de la identificación de las características fisicoquímicas y microbiológicas del agua residual a reusar, de la comparación de las diferentes metodologías empleadas para el tratamiento de las aguas residuales con este fin y de la descripción de la metodología de aplicación del ozono como post tratamiento de las aguas residuales, lo cual permitirá dar una idea más clara de las implicaciones y requerimientos que tiene el reúso identificando las ventajas y desventajas que tiene la aplicación. De esta forma, se pretende desarrollar un recurso que permita ayudar en la toma de decisiones y, al aplicarse, permita la reducción de las descargas de aguas residuales a las fuentes superficiales debido a su aprovechamiento en el riego y fertilización de cultivos, lo cual a su vez genera un beneficio económico al permitir la reducción de consumo de fertilizantes y dar un valor agregado a las aguas residuales tratadas.

3 OBJETIVOS

3.1 Objetivo general

Analizar el proceso de ozonificación como post tratamiento de las aguas residuales con fines de reúso en el sector agrícola.

3.2 Objetivos específicos

- Identificar la calidad del agua residual doméstica tratada requerida para el reúso de aguas residuales en el sector agrícola según los criterios de calidad relevantes a nivel nacional e internacional.
- Comparar los diferentes métodos que existen actualmente para realizar el tratamiento de las aguas residuales con fines de reúso en el sector agrícola.
- Describir la metodología utilizada para la aplicación del ozono como post tratamiento de las aguas residuales.

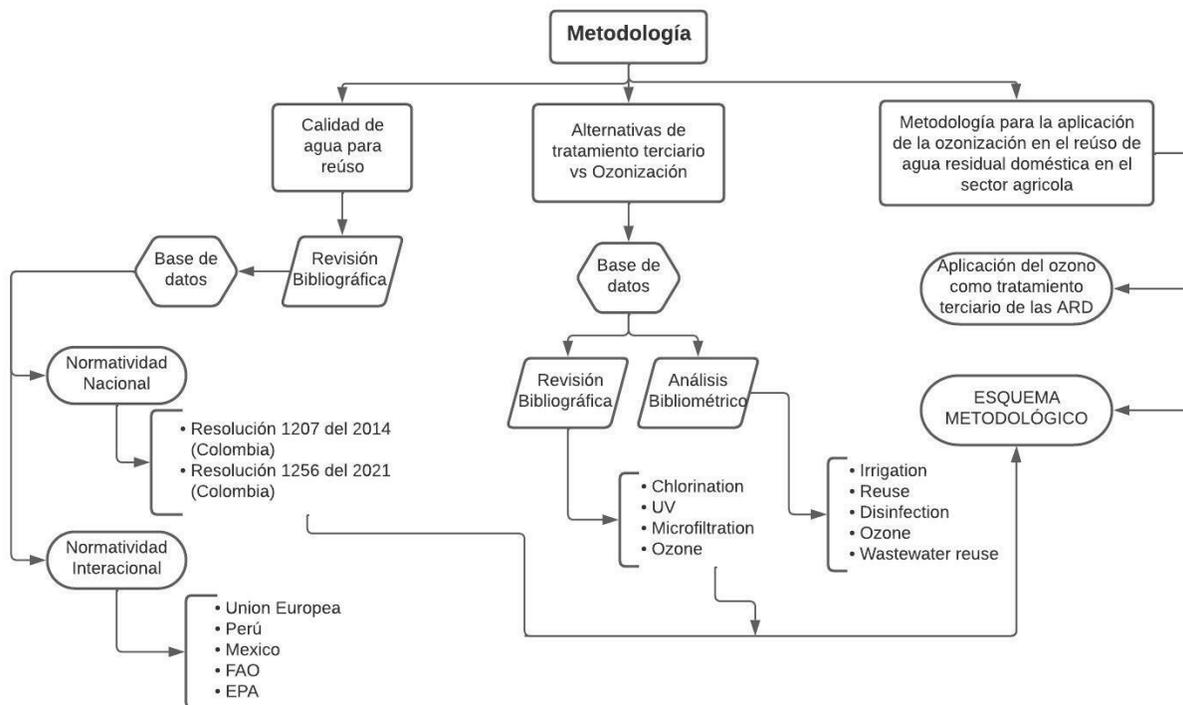
4 METODOLOGÍA

Para el desarrollo de la monografía se realizó inicialmente una revisión bibliográfica de la normatividad del reúso de las aguas residuales a nivel nacional e internacional con la finalidad de conocer las regulaciones que se tienen sobre el reúso para el sector agrícola y su relación entre sí. Se utilizó principalmente Scopus como base de datos para la revisión bibliográfica y el análisis bibliométrico usando las palabras enunciadas en la Figura 1. También, se estudió las diferentes alternativas de desinfección de aguas residuales para reúso y se realizó una comparación de estos métodos con respecto al ozono, para finalmente explicar el proceso de la ozonización y cómo se puede implementar este sistema, a través de un esquema metodológico.

A continuación, se observa un mapa conceptual con el fin de exponer la metodología que se empleará para el trabajo de monografía.

Figura 1.

Metodología empleada para la realización de la monografía.



5 CALIDAD DE AGUA DE REÚSO

5.1 Calidad de agua para reúso en el sector agrícola

El riego agrícola con aguas residuales domésticas no tratadas representa un serio riesgo en la salud pública, puesto que se convierte en una fuente de contaminación con patógenos a los alimentos y otras fuentes de agua, a través de bacterias, virus, protozoarios y helmintos que causan infecciones (World Health Organization, 2018). Algunas bacterias pueden causar diarrea, cólera, gastroenteritis, artritis, fiebre tifoidea, etc. Los huevos de helmintos pueden provocar infección por anquilostomiasis y clonorquiasis entre otras enfermedades. Los protozoos causan disentería, diarrea, fiebre, amebiasis, giardiasis, criptosporidiosis. Y algunas enfermedades respiratorias, gastroenteritis, fiebre, enfermedad cardíaca y renal son causados por virus. Se ha reportado que los huevos de helmintos pueden sobrevivir varios años en el suelo y varios meses en cultivos agrícolas (Singh, 2021). Una bacteria puede sobrevivir en aguas residuales de 10 a 60 días y en cultivos de 2 a 30 días, mientras que podría sobrevivir hasta 70 días en el suelo (Ministerio de Agricultura y Riego, 2016; Singh, 2021). Por tal razón se hace necesario la eliminación de estos organismos puesto que su tiempo de residencia en el ambiente puede ser de largos periodos siendo de gran peligro en los cultivos agrícolas donde pueden continuar proliferando y ser fuente de contaminación para personas que consumen estos alimentos directamente sin ningún procesamiento.

Las aguas residuales municipales pueden contener productos químicos orgánicos y sustancias químicas debido a la descarga de aguas residuales industriales, también se pueden encontrar contaminantes emergentes (medicinas, antibióticos, etc.); todos estos contaminantes pueden generar problemas de acumulación de sustancias potencialmente tóxicas en las plantas, por ejemplo, como puede suceder con metales como el cadmio y selenio (FAO, 2017; Peña et al., 2019).

Debido a la conciencia que se ha tenido sobre la limitación en la disponibilidad de los recursos hídricos, desde 1971 la Organización Mundial de la Salud (OMS) analizó la factibilidad del reúso de aguas residuales y su incorporación en la agricultura, teniendo en cuenta un control de la calidad del agua en cuanto a parámetros microbiológicos, fisicoquímicos y concentraciones de nutrientes, con el fin de proteger el medio ambiente y la salud pública (World Health Organization, 1989). La calidad del agua para reúso para la agricultura debe de tener en cuenta factores sanitarios, agronómicos y ambientales, por lo tanto, los criterios de calidad de las aguas residuales están enfocados a estos tres pilares; el primero busca promover la protección de la salud humana, el segundo proteger la calidad y productividad de los suelos

y el tercero busca proteger el medio ambiente de una contaminación por un inadecuado manejo de las prácticas de reúso (Lorenzo et al., 2009).

La calidad sanitaria estará determinada por las concentraciones de microorganismos como huevos de helmintos, bacterias y algunos virus. La calidad agronómica está relacionada con las concentraciones de nutrientes (nitrógeno, fósforo, potasio y oligoelementos), así como de aquellos elementos limitantes o tóxicos para la agricultura, como la salinidad y cantidades excesivas de metales tóxicos (World Health Organization, 2018). Debido a las afectaciones generadas por los organismos patógenos, se han establecido guías y regulaciones para el reúso seguro de las aguas residuales en diferentes aplicaciones (Metcalf & Eddy, 2013).

Organizaciones como la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, por sus siglas en inglés), la OMS y la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA, por sus siglas en inglés), han sugerido límites para parámetros indicadores de contaminación por patógenos como coliformes totales, coliformes fecales y huevos de helmintos en los que se plantean límites por categorías según la exposición. La OMS en las directrices establecidas en 1989, como se observa en la Tabla 1, propuso reducir los coliformes fecales (*E.coli*) a menos de 1000 UFC/ 100 mL de muestra, para así garantizar la calidad de riego de cualquier tipo de cultivo, como la categoría A, siendo un riego restringido puesto que se trata de cultivos de consumo crudo como las hortalizas. Para el caso de los cultivos menos restringidos asociado a la categoría B y C, no se requieren la remoción de coliformes puesto que no son alimentos para consumir sin previo proceso o cocción (World Health Organization, 1989). Durante varios años estas directrices han sido aplicadas total o parcialmente en los países del mundo, siendo la referencia en las normativas de los países latinos.

La FAO al igual que la OMS plantean tres categorías de exposición de las cuales se tienen parámetros más estrictos para la categoría A, luego la B y finalmente la C, es decir, entre más se tenga contacto con el agua residual de reúso, el riesgo de infección será mayor y por lo tanto los criterios de calidad serán más estrictos (FAO, 1992, 2017). La EPA clasificó el reúso en ocho categorías: urbano, áreas de acceso restringido, agrícola para cultivos consumidos crudos y para cultivos no consumidos crudos, recreacional, industrial, recarga de acuíferos y reúso indirecto potable (Tortajada, 2020). Para el sector agrícola la EPA determinó tres usos: riego superficial para alimentos crudos para consumo humano (ej. lechuga), riego de cultivos que se procesan comercialmente (ej. habichuelas enlatadas) y cultivo de cosechas que no son para consumo humano directo (ej. pasto para ganado, semillas, fibras). Para todos los casos la EPA recomienda realizar un tratamiento secundario y desinfección para lograr los parámetros de calidad requeridos en el agua de reúso (Soderberg, 2016).

Tabla 1.

Calidad microbiológica de aguas residuales para reúso en la agricultura, recomendado por la OMS en 1989.

Categoría	Condiciones del reúso	Grupo expuesto	Helmintos intestinales (huevos/L)	Coliformes fecales por 100 mL	Tratamiento sugerido
A	Riego de cultivos de consumo crudo, campos deportivos y parques públicos	Trabajadores, consumidores, usuarios	≤1	≤1000	Lagunas de estabilización en serie diseñadas para lograr la calidad microbiológica indicada o tratamiento similar
B	Riego de consumo cocido, cereales, cultivos industriales, forrajes y arboles	Trabajadores	≤1	Sin estándar de calidad recomendado	Retención en lagunas de estabilización entre 8 y 10 días o remoción equivalente de helmintos y coliformes fecales
C	Riego de cultivos de la categoría B, si no hay exposición de trabajadores y del público	Ninguno	Sin aplicación	Sin aplicación	Tratamiento preliminar según requerimiento de la tecnología de riego, pero no menor que sedimentación primaria.

Nota. Tomado de World Health Organization (1989).

Otro factor importante para el reúso de las aguas residuales es la productividad de los cultivos, ya que este tipo de proyectos requiere una viabilidad económica suficiente que permita incentivar esta actividad. Los cultivos pueden tener muchas variaciones y sus requerimientos de nutrientes pueden variar mucho, por lo cual las propiedades físicas y químicas del suelo y la tolerancia a la salinidad del cultivo son parámetros importantes para una debida aplicación (World Health Organization, 1989).

5.2 Normativa de calidad del agua para reúso relevante a nivel internacional

El reúso de aguas residuales tiene regulaciones diferentes en distintos países del mundo, basándose en general en la normativa de la EPA, FAO y/o OMS. En algunos lugares el uso puede llegar

hasta el abastecimiento, en otros sólo está permitido para usos industriales y agrícolas. Sin embargo, se cuenta con algo en común a nivel mundial y es que la regulación para la reutilización del agua residual debe cumplir con unos criterios de calidad. En la Tabla 2, se presenta el comparativo de los criterios de calidad de algunas normativas a nivel mundial y entre ellas las recomendaciones de la FAO y la EPA.

Tabla 2.

Comparativo de los criterios de calidad del agua recomendados para los para reúso de aguas residuales en el sector agrícola.

NORMAS INTERNACIONALES QUE REGULAN EL REUSO DEL AGUA								
PARÁMETRO	UNIDADES	Resolución 1207 de 2014 Colombia	Resolución 1256 de 2021 Colombia	NOM-003-ECOL-1997 México	Reglamento 2020/741 Unión Europea	Decreto Supremo N° 2020-MINAGRI Perú	FAO	EPA
Referencia		(Colombia. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2014)	(Colombia. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2021)	(México. Secretaría de Medio Ambiente Recursos Naturales y Pesca, 1997)	(Unión Europea. Parlamento Europeo y Consejo de la Unión Europea, 2020)	(Perú. Ministerio de Agricultura y Riego, 2020)	(FAO, 1992)	(EPA, 2004)
pH	Unidades de pH	6,00 -9, 00	4,5 -9,0	-	-	6,5-8,4	6,5 - 8	6
Conductividad	µs/cm	1500	1500	-	-	<1500	700 - 3000 ⁵	-
Sólidos disueltos totales	mg/L	-	.-	-	-	450-2000	450 - 2000 ⁵	500 -2000
Fenoles totales	mg/L	1,5	0,2	-	-	-	-	-
Hidrocarburos Totales	mg/L	1,0	1,0	-	-	-	-	-

NORMAS INTERNACIONALES QUE REGULAN EL REUSO DEL AGUA								
PARÁMETRO	UNIDADES	Resolución	Resolución1256 de	NOM-003-ECOL- 1997 México	Reglamento	Decreto	FAO	EPA
		1207 de2014 Colombia	2021 Colombia		2020/741 Unión Europea	Supremo N° 2020- MINAGRI Perú		
Cianuro Libre	mg/L	0,2	0,2	-	-	-	-	-
Cianuro	mg/L	-	-	2,0 - 3,0 ¹	-	-	-	-
Cloruros	mg/L	300	300	-	-	<500	1100	-
Fluoruros	mg/L	1,0	1,0	-	-	1	1,0	-
Flúor	mg/L	-	1,0	-	-	-	-	1,0 -15 ³
Sulfatos	mg/L	500	500	-	-	500	1000	-
Aluminio	mg/L	5,0	5,0	-	-	5	5,0	5-20 ³
Berilio	mg/L	0,10	0,10	-	-	0,1	0,10	0,1 -0,5 ³
Cadmio	mg/L	0,01	0,01	0,2 - 0,4 ¹	-	0,01	0,01	0,01 - 0,05 ³
Cinc	mg/L	3,0	2,0	10 - 20 ¹	-	-	2,0	2 -10 ³
Cobalto	mg/L	0,05	0,05	-	-	0,05	0,05	0,05 -5,0 ³
Cobre	mg/L	1,0	0,2	4,0 - 6,0 ¹	-	0,2-0,5	0,20	0,2- 5,0 ³
Cromo	mg/L	0,10	0,1	1,0 - 1,5 ¹	-	0,1-0,5	0,10	0,1 -1,0 ³
Hierro	mg/L	5,0	5	-	-	5	5,0	5,0 -20 ³
Mercurio	mg/L	0,002	0,001	0,01 - 0,02 ¹	-	0,001	-	-
Litio	mg/L	2,5	2,5	-	-	2,5	2,5	2,5
Manganeso	mg/L	0,2	0,2	-	-	0,2	0,2	0,2 -10 ³
Molibdeno	mg/L	0,07	0,01	-	-	-	0,01	0,01 -0,05 ³

NORMAS INTERNACIONALES QUE REGULAN EL REUSO DEL AGUA								
PARÁMETRO	UNIDADES	Resolución	Resolución1256 de	NOM-003-ECOL- 1997 México	Reglamento	Decreto	FAO	EPA
		1207 de2014 Colombia	2021 Colombia		2020/741 Unión Europea	Supremo N° 2020- MINAGRI Perú		
Níquel	mg/L	0,2	0,2	2,0 - 4,0 ¹	-	0,2	0,2	0,2 - 2,0 ³
Plomo	mg/L	5,0	5	0,5 - 1,0 ¹	-	0,05	5,0	5,0 - 10 ³
Sodio	mg/L	200	200	-	-	-	900	-
Vanadio	mg/L	0,1	0,1	-	-	-	0,1	0,1 - 1,0 ³
Antimonio	mg/L	0,05	0,1	-	-	-	-	-
Arsénico	mg/L	0,1	0,1	0,2 - 0,4 ¹	-	-	0,1	0,1 - 2,0 ³
Boro	mg/L	0,4	0,3 - 4,0	-	-	0,7-3	0,7 - 3,0 ⁵	0,75 - 2,0 ³
Selenio	mg/L	0,02	0,02	-	-	-	0,02	0,02
Calcio	mg/L	-	-	-	-	-	400	-
Magnesio	mg/L	-	-	-	-	-	60	-
Cloro Total Residual	mg/L	Menor a 1,0	<1,0	-	-	1	-	<1,0
Nitrógeno	mg/L	-	-	-	-	5.-30	30	-
Nitratos	mg/L	5,0	11	-	-	<5	5 - 30 ⁵	-
Enterococos Fecales	NMP/100 mL	1E+02	-	-	-	-	-	-
Coliformes Totales	NMP/100 mL	-	5000	-	-	-	-	-

NORMAS INTERNACIONALES QUE REGULAN EL REUSO DEL AGUA								
PARÁMETRO	UNIDADES	Resolución 1207 de2014 Colombia	Resolución1256 de 2021 Colombia	NOM-003-ECOL- 1997 México	Reglamento 2020/741 Unión Europea	Decreto Supremo N° 2020- MINAGRI Perú	FAO	EPA
Coliformes Fecales	NMP/100 mL	1E+05	1000	240 - 1000 ²	-	<1000	1000 ⁴	No detectable - <200 ⁶
<i>E.coli</i>	UFC/100 mL	-	-	-	A: ≤10 B: ≤100 C: ≤1000 D: ≤10000 ⁷	-	-	-
<i>Legionella</i>	UFC/L				<1000 ⁸	-		
Helmintos Parásitos Humanos	Huevos y Larvas/L	1,0	-	1 - 5 ¹	≤1 ⁸	≤1	1,0 ⁴	-
Protozoos Parásitos Humanos	Quistes /L	1,0	-	-	-	-	-	-
<i>Salmonella</i> sp.	NMP/100 mL	1,0	-	-	-	-	-	-
Porcentaje de absorción de sodio (RAS)		-	Análisis y reporte	-	-	-	15	-

NORMAS INTERNACIONALES QUE REGULAN EL REUSO DEL AGUA								
PARÁMETRO	UNIDADES	Resolución 1207 de 2014 Colombia	Resolución 1256 de 2021 Colombia	NOM-003-ECOL- 1997 México	Reglamento 2020/741 Unión Europea	Decreto Supremo N° 2020- MINAGRI Perú	FAO	EPA
Conductividad según RAS	ds/m	-	-	-	-	-	0,7 - 2,0 ⁵	-
		-	-	-	-	-	1,2 - 0,3 ⁵	-
		-	-	-	-	-	1,9 - 0,5 ⁵	-
		-	-	-	-	-	2,9-1,3 ⁵	-
Porcentaje de sodio posible (PSP)		-	Análisis y reporte	-	-	-	-	-
		-	Análisis y reporte	-	-	-	-	-
Salinidad efectiva y potencial		-	Análisis y reporte	-	-	-	-	-
Carbonato de sodio residual		-	Análisis y reporte	-	-	-	-	-
Radionucleidos		-	Análisis y reporte	-	-	-	-	-
Bicarbonato	mg/L	-	-	-	-	90-500	600	-
Turbiedad	NTU	-	-	-	<5 ⁹	-	-	< 2 ⁶

NORMAS INTERNACIONALES QUE REGULAN EL REUSO DEL AGUA								
PARÁMETRO	UNIDADES	Resolución 1207 de 2014 Colombia	Resolución 1256 de 2021 Colombia	NOM-003-ECOL- 1997 México	Reglamento 2020/741 Unión Europea	Decreto Supremo N° 2020- MINAGRI Perú	FAO	EPA
Demanda bioquímica de oxígeno (DBO)	mg/L	-	-	20 - 30 ²	<10 ⁹	30	<10 ⁴	10 - 30 ⁶
Sólidos suspendidos totales	mg/L	-	-	20 - 30 ²	<10 ⁹	30	-	-
Grasas y/o aceites	mg/L	-	-	15	-	<300	-	-

Nota. Los espacios en blanco no se especifican en la norma.

¹El primer valor indica el criterio del promedio diario (PM) y el segundo valor el criterio del promedio mensual (PD) según la norma Oficial Mexicana NOM-003-ECOL-1997.

²El primer valor indica la categoría de "contacto directo" y el segundo valor la categoría de "contacto indirecto" según la norma Oficial Mexicana NOM-003-ECOL-1997.

³Indica que el primer parámetro referenciado aplica para uso a corto plazo y el segundo a largo plazo según los criterios establecidos por la EPA.

⁴Para los parámetros microbiológicos recomendados por la FAO, se toman la categoría A, "Riego de cultivos susceptibles de ser consumidos crudos, campos deportivos, parques públicos".

⁵Indica que valores por debajo del primer parámetro referenciado no tienen ningún grado de restricción, valores entre los dos parámetros referenciados poseen un grado de restricción moderada y, valores por encima del segundo valor referenciado poseen un grado de restricción severo según los criterios establecidos por la FAO.

⁶El primera valor indica que el valor fue tomado de la categoría de "Cultivos de alimentos para consumo crudo NO procesados comercialmente" y el segundo valor de la categoría "Cultivos de alimentos procesados comercialmente", este último valor es el mismo para "Riego de cosechas que no es consumido por los seres humanos, incluye pasto y semillas" según las recomendaciones de la EPA.

⁷Se establecen los valores de acuerdo con la clase de calidad para la categoría del cultivo. Clase A "cultivos de alimentos que se consumen crudos", clase B y C "cultivos de alimentos que se consumen crudos cuando la parte comestible se produce por encima del nivel del suelo y no está en contacto directo con las aguas regeneradas, incluido alimentos para animales", clase D "Cultivos industriales, energéticos y productores de semillas" según el Reglamento (UE) 2020/741.

⁸Es el mismo valor para todas las categorías según el Reglamento (UE) 2020/741.

⁹Para clase A "cultivos de alimentos que se consumen crudos" según el Reglamento (UE) 2020/741.

En general los parámetros microbiológicos son aquellos que se encuentran recurrente en cada normativa, esto debido a su gran importancia y afectaciones a nivel de salud pública. Mientras que la rigurosidad y la inclusión de valores de metales pesados y compuestos químicos varían entre un país y otro, teniendo en cuenta que son valores muy semejantes a lo establecido por la FAO y la EPA.

La normativa de la Unión Europea (UE) para la reutilización de agua residual en la agricultura se basa en el reglamento 2020/741 del Parlamento Europeo y del Consejo del año 2020, aplicable a partir del 2023; esta norma se instauró como contribución a la lucha contra la escasez del agua, puesto que es un fenómeno que afecta al menos al 11% de la población europea y al 17% del territorio de la UE (Sala-Garrido et al., 2020). Además, de acuerdo con las proyecciones, el cambio climático magnificará los problemas de escasez de agua y de sequía en el territorio europeo (Agencia Europea de Medio Ambiente, 2018). La normativa de la UE es de obligatorio cumplimiento en los estados miembros y así como se observa en la Tabla 2 establece los requisitos mínimos de calidad y control de agua para asegurar la utilización de agua reusada.

Aunque existan países miembros de la UE que cuenten con normativa específica como España con el Real Decreto 1620/2007, se debe introducir dentro de las normativas propias de cada país miembro los parámetros establecidos en el reglamento UE (Sala-Garrido et al., 2020). En cuanto a los criterios microbiológicos la UE es más exigente en coliformes fecales, puesto que la normativa española para alimentos crudos exige 100 UFC/100 mL (España. Ministerio de Presidencia, 2007), mientras que el reglamento de la UE establece ≤ 10 UFC/100 mL. También, es más estricta para sólidos suspendidos, turbiedad y establece Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) como parámetro de calidad.

Las unidades para coliformes fecales en la normativa de UE es en unidades formadoras de colonia (UFC), mientras que la EPA, FAO y OMS en número más probable (NMP), por tal razón al ser dos métodos de cuantificación diferente no es posible realizar una comparación directa; sin embargo, cabe resaltar que la UE establece rangos diferentes para cada una de las cuatro (4) categorías establecidas, delimitando para la categoría de cultivos de alimentos crudos ≤ 10 UFC/100 mL y hasta ≤ 10000 UFC/100 mL para cultivos industriales y semillas. Mientras que la FAO establece solo un valor de acuerdo con lo reportado por la OMS (Tabla 1) y la EPA establece dos valores bastante estrictos, siendo uno de estos para la categoría de alimentos crudos, ausencia de coliformes fecales, lo que la vuelve la norma más estricta en cuanto a este parámetro en comparación de todas las normativas referenciadas en la Tabla 2.

En cuanto a los países latinoamericanos se referenciaron Perú y México además de Colombia, puesto que han sido países con alto crecimiento en la optimización de recursos hídricos (Silva et al., 2008)(Rodríguez et al., 2020). Según la Tabla 2 la cantidad de coliformes fecales en agua de reúso para la

agricultura, es más estricto en la normativa mexicana para cultivos de contacto directo, en comparación con Colombia y Perú. Además, en la Resolución 1256 de 2021 vigente de Colombia, a diferencia de la anterior Resolución 1207 de 2014, no existe un valor establecido para nemátodos, siendo la normativa menos rigurosa en aspectos microbiológicos en comparación con las demás que incluso incorporan *Legionella*. Esto podría ser un punto de retroceso en la implementación o actualización de la normativa colombiana, puesto que tampoco se incluye *Salmonella* y a nivel de salud pública se tiene conocimiento que los nematodos pueden sobrevivir largo tiempo en los cultivos y son organismos peligrosos para la salud de los seres vivos, ya que solo con ingerir un huevo podría generar parasitosis, por esto la importancia en el control del organismo a través de la normativa (Ministerio de Agricultura y Riego, 2016).

Finalmente, estudios recomiendan que el recuento de *E. coli* para cultivos de raíces debe estar por debajo de 10^3 UFC/100 mL. Para cultivos de hoja es 10^4 UFC/100 mL y para cultivos con riego por goteo es 10^5 UFC/100 mL. Asimismo, el conteo de huevos de helmintos (n/L) debe ser inferior a uno para todas las condiciones (Singh, 2021), esto relacionado con lo reportado desde 1990 por la OMS para los parámetros microbiológicos (Mara & Cairncross, 1990).

5.3 Normativa de calidad del agua para reusó en Colombia

En los últimos años en Colombia han aumentado los esfuerzos con la ejecución de los Planes de Manejo de Aguas Residuales Municipales (PMAR), pues antes del año 2010 solo el 8% de las aguas residuales municipales eran tratadas. Sin embargo, entre los años 2010 y 2018 se dio un incremento de aguas residuales tratadas del 25% al 42,8% y, de acuerdo con lo establecido en Plan Nacional de Desarrollo (PND) 2019-2022, y los objetivos estratégicos planteados por el Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio (MVCT), se busca alcanzar el tratamiento del 54,3% de las aguas residuales municipales en 2022 y el 68,6% en 2030 (Departamento Nacional de Planeación, 2019).

A través de los años la mayoría de estrategias para el control de la contaminación por descarga de aguas residuales se han basado en la depuración de estas para posteriormente realizar su descarga; sin embargo, en países como China, México y Estados Unidos se ha fortalecido la idea del aprovechamiento de aguas residuales tratadas, siendo el reusó una de las más llamativas, puesto que no solo se basa en disminuir costos, sino que esta actividad permite tener un mayor control de la contaminación que se genera, debido a que se reducen los consumos de agua a la vez que se reducen los vertimientos, haciendo un uso eficiente del agua residual tratada, no obstante, su sostenibilidad requiere una participación activa

de las entidades medioambientales, fondos económicos, una selección adecuada de la tecnología, la operación del sistema de tratamiento y su mantenimiento en el tiempo.

En Colombia, el reúso de aguas residuales tratadas estuvo legislado por la Resolución 1207 de 2014, en esta se definieron los actores involucrados, permisos necesarios, actividades autorizadas y límites máximos permisibles para el reúso de aguas residuales tratadas; pero la aplicación del reúso se ha visto desestimada debido a que esta legislación no es clara con el tipo de aguas residuales destinadas para cada uso en concreto, y solo autoriza algunas actividades dejando por fuera gran cantidad de potenciales actividades (fertilización de suelos, riego de zonas verdes residenciales, lavado de vehículos, lavado de maquinaria y zonas de trabajo, perforación exploratoria minera o petrolera) y prohíbe el cobro por el suministro de agua residual tratada (artículo 3, párrafo 1) (Colombia. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2014), anulando así la posibilidad de obtener un beneficio y retorno de la inversión de los sistemas de tratamiento.

Recientemente la Resolución 1256 de 2021 derogó la Resolución 1207 de 2014; en esta nueva normativa se dan una serie de definiciones como es el caso de agua de reúso y recirculación. También se explica el proceso de concesión requerido para realizar el reúso del agua residual, en donde además se establece la función de cada actor dentro del permiso, indicando la posición de “usuario generador” como aquel que genera las aguas residuales y el “usuario receptor” como aquel que usa las aguas residuales, los cuales a su vez tienen un punto de recepción de las aguas residuales en el cual se hace la transferencia de estas para su reúso y un punto de control en el cual se deben de realizar las mediciones respectivas para verificar el cumplimiento con los criterios de calidad del agua residual para reúso (Colombia. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2021).

En cuanto a los criterios de calidad, la actual normativa definió que se deben de cumplir los criterios y usos expuestos por la Resolución 1076 del 2015, donde se incluye el uso agrícola. El artículo 2.2.3.3.9.5 cita el artículo 40 del Decreto 1584 de 1984, en el que se establecen límites para pH, metales, coliformes fecales y totales y parámetros relacionados con la salinidad del agua como la conductividad, Relación de Absorción de Sodio (RAS), Porcentaje de Sodio Posible (PSP), salinidad efectiva y potencial y carbonato de sodio residual, además de radionucleidos. Adicional a los parámetros mencionados, la Resolución 1256 de 2021 exige el cumplimiento con criterios de calidad adicionales de aguas residuales para uso agrícola con parámetros como conductividad, antimonio, fenoles totales, hidrocarburos totales, cianuro libre, cloruros, fluoruros, sulfatos, mercurio, sodio, cloro total residual y nitratos.

En el estudio para el otorgamiento de la concesión también se deberá de presentar un balance hídrico por parte del usuario receptor contemplando el volumen entregado por el usuario generador, la

identificación de los riesgos potenciales a los recursos naturales renovables derivados del uso de las aguas residuales, las medidas preventivas que se deben aplicar para evitar los riesgos potenciales identificados con sus respectivas actividades de seguimiento, evaluación de vulnerabilidad intrínseca de los acuíferos a la contaminación a escala 1:25.000 o de mayor detalle, plan de monitoreo y seguimiento de la calidad y cantidad del agua residual empleada en el reúso y mediciones *in situ* de la velocidad de infiltración, tasa de aplicación y tiempo de aplicación según los periodos estacionales y requerimientos del suelo, verificando que no se exceda la aplicación generando escorrentía, percolación o cambios en la salinidad, sodicidad y toxicidad del suelo que limiten, restrinjan o impidan los usos agrícolas actuales y potenciales del área de aplicación para lo cual esta resolución remite a las directrices por tipo de cultivo establecidas por el Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural (MADR) o la FAO.

La Resolución 1256 de 2021 surge con la finalidad de promover la aplicación del reúso de aguas residuales tratadas en Colombia; sin embargo, a pesar de que en esta nueva resolución no se prohíbe la valorización de las aguas residuales tratadas, aún se restringe el uso de estas aguas, pues se excluye su uso para fertilización o acondicionador de suelos (artículo 1, parágrafo 1) (Colombia. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2021), se dejan por fuera muchas potenciales actividades aptas para hacer uso de aguas residuales tratadas, no se establecen criterios de calidad claros para las actividades industriales, se imponen trámites y requisitos técnicos complejos, y se excluyen análisis microbiológicos como los helmintos que han sido descritos desde hace años como microorganismos de control en el agua para evitar enfermedades. En general, aunque se establecen algunas medidas de control para asegurar una adecuada ejecución del reúso, su complejidad puede desincentivar la aplicabilidad del reúso de aguas residuales tratadas en Colombia.

6 ALTERNATIVAS DE TRATAMIENTO CON FINES DE REÚSO EN EL SECTOR AGRÍCOLA

La OMS menciona que las vías de transmisión o exposición a patógenos por el uso de aguas residuales pueden darse por contacto con el agua residual o cosechas contaminadas, consumo de productos regados con agua residual, consumo de animales o productos que han sido contaminados con el agua residual; entretanto, los riesgos varían de acuerdo con los grupos expuestos, ya sea por un contacto directo o indirecto con el agua residual (Instituto Mexicano de Tecnología del Agua y el Ministerio de Medio Ambiente y Agua de Bolivia, 2018).

Por lo anterior, el principal riesgo al hacer reúso de aguas residuales se basa en su contenido de patógenos y otros contaminantes microbiológicos, pues son aguas de desecho que pueden afectar

directamente la salud humana por una baja calidad sanitaria al consumir los alimentos que tuvieron contacto con esta. En este sentido, el tren de tratamiento debe tener la capacidad de mejorar este punto crítico al implementar un proceso de desinfección previo al riego de los cultivos.

El tratamiento de las aguas residuales se basa generalmente en varias etapas: preliminar, primario, secundario y terciario. El tratamiento preliminar se encarga de la remoción de sólidos gruesos, arenas y grasas. El tratamiento primario es un proceso físico o en algunas ocasiones fisicoquímico que consta de la remoción de sólidos sedimentables, en ocasiones sólidos suspendidos coloidales por la acción de la gravedad y en algunos casos utiliza procesos químicos para favorecer la floculación y sedimentación. El tratamiento secundario se basa en un proceso biológico donde se remueve la materia orgánica disuelta, sólidos suspendidos y algunos microorganismos. Finalmente, el tratamiento terciario disminuye en gran proporción microorganismos patógenos (desinfección) y remueve nutrientes del efluente. En la Tabla 3 se observa un resumen de los tipos de tratamiento y la posible remoción que se puede obtener para cada etapa.

Tabla 3.

Características de los diferentes tipos de tratamiento.

Ítem	Tratamiento			
	Preliminar	Primario	Secundario	Terciario
Contaminantes removidos	Sólidos gruesos	SST -SSD - materia orgánica (parcial)	Materia orgánica suspendida - materia orgánica disuelta (parcial) -patógenos (arcial)	Contaminantes específicos - materia orgánica fina y soluble -patógenos (principalmente)
Eficiencias de remoción	DBO: 0 -5 %	SST 60- 70%	SST 60- 99%	SST > 99% DBO > 99 % Nutrientes > 90%
Remoción de bacterias (unidades log₁₀)	-	0-1	1 -2.	2 - 6.
Mecanismo predominante	Físico	Físico	Biológico y/o químico	Biológico y/o químico
Cumple con vertimiento	No	No	Si	Si
Cumple patrón de reusó	No	No	Si	Si

Aplicación	Etapa inicial de tratamiento de aguas residuales	Tratamiento parcial. Se recomienda evitar el reusó del agua	Se recomienda su aplicación de reusó posterior a una desinfección	Se recomienda para reusó en el sector agrícola.
-------------------	--	---	---	---

Nota. Adaptado de Silva et al. (2008) & Singh (2021).

De acuerdo con la literatura el agua residual puede contener bacterias en el orden de 10^6 y 10^{10} por litro, en cuanto a helmintos y protozoos varían entre 10^3 y 10^4 respectivamente (Metcalf & Eddy, 2013; Singh, 2021). Sin embargo, como se observa en la Tabla 3, con el tratamiento primario se remueven máximo 10^1 bacterias y en tratamiento secundario generalmente de 10^3 bacterias y entre 0- 10^2 helmintos en sistemas de lodos activados (Lorenzo et al., 2009). De este modo, el tratamiento primario no permite obtener la calidad necesaria en cuanto a parámetros microbiológicos para el reuso en riego agrícola de acuerdo con la normativa enunciada en la Tabla 2.

En cuanto al proceso secundario, la calidad puede variar según el tipo de tratamiento utilizado; en algunas lagunas que cuentan con más de 10 días de estabilización a diferencia de lodos activados que pueden variar entre 2 y 3 días, se pueden obtener efluentes con una cantidad de coliformes fecales en el orden de 10^3 y 10^5 , por lo que es posible obtener valores de coliformes dentro del rango recomendado por la OMS y FAO de 10^3 NMP/100 mL para riego de categoría A (lechuga, zanahoria, hortalizas) o cultivos de alto riesgo como se observa en la Tabla 2, y en el caso de una eliminación de helmintos menor a 1 n/L y valores superiores a 10^3 NMP/100 mL se puede cumplir con la categoría B según la OMS, donde se incluye riego a cultivos con menores riesgos por ser de tallo alto (árboles de frutales), procesados (arroz, trigo) y alimentos para el ganado (forrajes) o aquellos que no son alimentos (algodón) (Autoridad Nacional del Agua, 2016).

Adicionalmente, se han reportado cantidades representativas de quites de protozoos en los efluentes de tratamiento secundario, como lo es en lodos activados; lo que revela la poca eficiencia de estos procesos para la eliminación de *Cryptosporidium* y *Giardia* (Ramo et al., 2017). Actualmente no se incluye límite de protozoos dentro de la normativa internacional y nacional (Tabla 2) teniendo en cuenta que estos organismos pueden generar riesgos en salud pública, por esta razón se hace necesario aumentar esfuerzos en la integración de este parámetro como control para aguas de reuso, en especial para riego en cultivos de consumo directo. Cabe mencionar que en la normativa colombiana para agua potable (Resolución 2115/2007) se exige la ausencia de *Giardia* y *Cryptosporidium* para el agua de consumo

humano, por lo que es necesario restringir la presencia de estos microorganismos en aguas de reúso de la agricultura puesto que hay estudios donde se ha evidenciado la presencia de protozoos en vegetales y frutas que se han sido regadas con agua de reúso (Domenech et al., 2018).

Debido a que el tratamiento preliminar, primario y hasta el secundario no logran un efluente con las calidades requeridas para el reúso en el sector agrícola, es necesario realizar desinfección o tratamiento terciario para lograr remociones de microorganismos, como las bacterias entre 10^2 y 10^6 (Lorenzo et al., 2009).

6.1 Tratamiento terciario para reúso en agricultura

La desinfección es un proceso terciario con el fin de eliminar microorganismos patógenos en el agua, típicamente utiliza tratamientos físicos o químicos. Garantizar un agua de reúso con un proceso de desinfección eficiente permite la protección de la salud y el uso directo del agua tratada en el riego de los cultivos de consumo humano. Para lo anterior, los tratamientos terciarios de desinfección se mencionan en los ítems siguientes.

6.1.1 Cloración

La cloración en aguas residuales es el método de desinfección más utilizado en la actualidad, el cloro añadido reacciona con sustancias reductoras, la materia orgánica y el amoníaco, donde se da la formación de cloraminas y compuestos orgánicos de cloro, luego estos se irán destruyendo conforme se adicione más cloro hasta obtener cloro residual libre.

Tabla 4.

Ventajas y desventajas de cloración en la desinfección de aguas residuales tratadas.

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> • Remoción eficiente de bacterias y virus. • Se utiliza como oxidante de algunos metales. • Bajo costo de inversión. • Tiempo de contacto bajo entre 20 y 30 minutos para coliformes fecales. 	<ul style="list-style-type: none"> • Requiere un tratamiento previo que reduzca la turbiedad y materia orgánica para reducir generación de subproductos. • Es necesario una capacitación del personal para su uso y dosificación.

<ul style="list-style-type: none"> • Concentraciones comunes de cloro total entre 0,2 y 0,5 mg/L (dependiente de la calidad del agua) para coliformes y virus. 	<ul style="list-style-type: none"> • Puede formarse sustancias no deseadas como los trihalometanos y organoclorados considerados desde el punto de vista sanitario nocivos para salud humana. • Baja efectividad en protozoos. • Para remover algunos organismos requiere altas dosis y tiempos de contacto, aumentando los costos de operación.
---	---

Nota: Información tomada de EPA (2006) & Leonel & Tonetti (2021) & Lonigro et al. (2017).

Como se puede evidenciar en la Tabla 4, a pesar de ser uno de los métodos más utilizados de desinfección, este presenta inconvenientes para una aplicación segura con fines de reúso en el sector agrícola, debido a que se deberá tener una calidad del agua con bajo contenido de materia orgánica, sólidos y turbiedad, ya que estos interfieren con el proceso de desinfección por cloración. Además, el cloro reacciona con la materia orgánica generando los subproductos de desinfección (DBP, por sus siglas en inglés), muchos de los cuales son mutagénicos y cancerígenos (Leonel & Tonetti, 2021). Estudios han demostrado que la presencia de cloro libre en agua de reúso para el riego agrícola genera como resultado la acumulación de compuestos organohalogenados en el suelo, lo que produce una pérdida en la fertilidad de este y aumenta la bioacumulación en los frutos (Lonigro et al., 2017).

Adicionalmente, *Giardia* y *Cryptosporidium*, particularmente este último, son resistentes a los desinfectantes a base de cloro en las concentraciones y tiempos de exposición comúnmente utilizados en la industria del agua (Leonel & Tonetti, 2021). Estudios demuestran que debe mantenerse un Ct (concentración de cloro por tiempo de contacto) más alto para obtener inactivación de quistes de *Giardia* en comparación de los valores utilizados para remoción de coliformes fecales (Adeyemo et al., 2019; Leonel & Tonetti, 2021). Se ha evidenciado que concentraciones superiores a 10 mg/L de cloro libre perjudican el desarrollo de la lechuga y cuanto más sea el cloro residual y exista presencia de materia orgánica en el agua mayor será la cantidad de subproductos que se forman (Lonigro et al., 2017).

Existen sistemas de tratamiento que han modificado su sistema de desinfección de cloración por ozonización, como es el caso de la PTAR en Costa Rica, donde la Junta de Agua Potable y Alcantarillado de Culiacán (JAPAC) se encargó de cambiar el sistema de desinfección para garantizar el reúso del agua en la agricultura a bajo costo y sin impacto ambiental puesto que, según la entrevista realizada al especialista

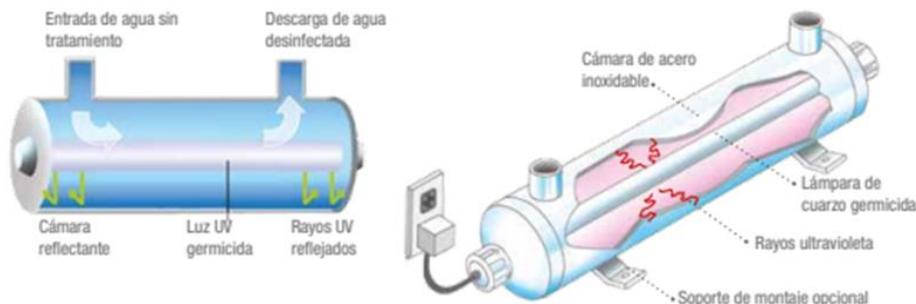
en tratamiento de aguas con ozono, con el cloro generaban malos olores y resultaban productos tóxicos para la salud mientras que con el ozono la desinfección es natural, más eficiente y limpia (Iagua, 2016).

6.1.2 Rayos ultravioletas (UV)

La desinfección por UV es utilizada como mecanismo avanzado para la eliminación de patógenos y microorganismos causantes de enfermedades gastrointestinales en los seres humanos; se basa en fotones emitidos por las lámparas en la longitud de onda entre 100 nm y 400 nm; dicha luz reacciona directamente con el ADN y ARN de los microorganismos inhibiendo su crecimiento y reproducción, produciendo además daños en proteínas, enzimas y otras moléculas (Lui et al., 2014). La desinfección se da a través del contacto del agua con la luz UV, siendo un método físico puesto que no es necesario aplicar algún químico. En este proceso, el agua es irradiada con luz de baja longitud de onda a medida que pasa a través de una tubería, como se observa en la Figura 2.

Figura 2.

Sistema de desinfección UV.



Nota: Tomado de Instituto Mexicano de Tecnología del Agua y el Ministerio de Medio Ambiente y Agua de Bolivia (2018).

El UV es una alternativa usada a escala mundial puesto que garantiza un beneficio alto en cuanto costo-beneficio. Se ha reportado que dosis de 10 a 40 mJ cm^{-2} permite la inactivación de microorganismos (Lui et al., 2014). Según la EPA, se debe asegurar una dosis de 40 mJ cm^{-2} para la inactivación de *Giardia* y *Cryptosporidium* (EPA, 2006). Otra ventaja del UV es que no genera subproductos tóxicos, pero la inactivación de los microorganismos depende en gran medida del tiempo de contacto y la calidad del agua,

puesto que, a mayor turbidez o presencia de sólidos en el medio disminuye el efecto de la radiación UV ya que estos afectan la dispersión de la luz y los microorganismos se “ocultan” en los sólidos evitando el contacto directo con la luz UV (Adeyemo et al., 2019). En la Tabla 5 se resumen las ventajas y desventajas del tratamiento con UV.

Tabla 5.

Ventajas y desventajas de los rayos ultravioleta (UV) en desinfección de aguas residuales tratadas.

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> • No es necesario la adición de un agente químico. • El espacio requerido dentro del tratamiento es pequeño y de fácil instalación. • No produce sabor en el agua. • Es efectivo en la remoción de microorganismos resistentes. • Tiempo de contacto entre 20 y 30 segundos. • No forman subproductos como trihalometanos. • Bajo costo de mantenimiento. 	<ul style="list-style-type: none"> • Inversión inicial alta. • Altos costos en energía eléctrica. • Mantenimiento frecuente. • El tratamiento previo a la desinfección debe ser adecuado, puesto que hay condiciones en SST > 30mg/L que pueden reducir la efectividad. • El mercurio del cual está hecho las lámparas, es un metal peligroso para el ambiente. • La duración o vida útil de las lámparas es relativamente corta, aproximadamente 10.000 horas.

Nota. Información tomada de EPA (2006) & Adeyemo et al. (2019) & Leonel & Tonetti (2021).

6.1.3 Micro y ultrafiltración con tecnologías de membranas

La microfiltración es un proceso en el cual pasa el fluido a través de una membrana microporosa que retiene los sólidos con tamaños desde 0,1 a 1 micras o micrones. Esta técnica es capaz de remover sólidos en suspensión, bacterias etc. Es combinada con la ultrafiltración la cual contiene una membrana con un poro de 0,01 μm logra la remoción de virus. Esta metodología de desinfección también requiere un tratamiento previo donde se garantice la remoción de los sólidos suspendidos totales en el agua residual (Instituto Mexicano de Tecnología del Agua y el Ministerio de Medio Ambiente y Agua de Bolivia, 2018).

Para usar este sistema se requiere de un pretratamiento o pre-filtrado con poro entre 0,5-1 mm, con el fin de no saturar rápidamente las membranas. Esta tecnología requiere varios equipos, como son bombas, depósitos de agua y membranas por lo que los costos de inversión son altos y requiere de fuentes

eléctricas aumentando también los costos de operación (Instituto Mexicano de Tecnología del Agua y el Ministerio de Medio Ambiente y Agua de Bolivia, 2018). La ventajas y desventajas de esta alternativa se presentan en la Tabla 6.

Tabla 6.

Ventajas y desventajas de la tecnología de membranas en desinfección de aguas residuales tratadas.

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> • Remoción eficiente de bacterias y virus del agua tratada. • Es aplicada en el sector de alimentos por lo que podría utilizarse para un riego en productos de consumo directo. 	<ul style="list-style-type: none"> • Alta inversión inicial. • Costo alto de consumo de energía eléctrica. • Equipo robusto. • Mantenimiento de membranas por colmatación. • Requiere tratamiento previo.

Nota. Información tomada de Instituto Mexicano de Tecnología del Agua y el Ministerio de Medio Ambiente y Agua de Bolivia (2018).

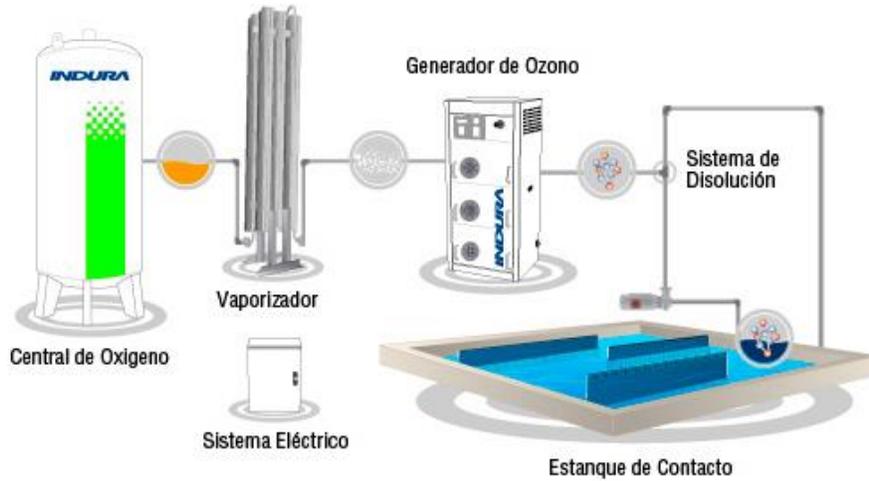
Se ha utilizado este tipo de sistema como pretratamiento de procesos de desinfección con UV en aguas residuales tratadas, permitiendo remover aproximadamente un 79% de SST y 76% de turbiedad y las bacterias coliformes que pasaban a través de las membranas fueron removidas en el proceso de desinfección (Beck et al., 2021); también se ha reportado que la ultrafiltración permite la reducción de indicadores microbiológicos aproximadamente en 3 Log₁₀ (Gatta et al., 2016).

6.1.4 Ozonización

Actualmente la desinfección con ozono está constituida como uno de los oxidantes de mayor efectividad ya que estos generan los radicales hidroxilos (OH) que interaccionan con los compuestos orgánicos del agua en condiciones catalíticas y no catalíticas (Leonel & Tonetti, 2021). Este tratamiento de desinfección se ha utilizado en países desarrollados desde el siglo XVIII debido a su efectividad para remover bacterias, virus y protozoos en comparación con la cloración (Instituto Mexicano de Tecnología del Agua y el Ministerio de Medio Ambiente y Agua de Bolivia, 2018). El gas ozono se produce a partir del oxígeno puro y el equipo en la industria está compuesto por un generador de ozono (incluye filtros de aire), un sistema difusor y un tanque de contacto como se observa en la Figura 3.

Figura 3.

Sistema de ozonización como tratamiento de desinfección.



Nota. Tomado de la página web Desinfección y Sanitización Mediante Ozono.

Se ha reportado que el efecto del ozono en los microorganismos ocurre a través del daño en los ácidos grasos de la membrana celular, modificando proteínas y enlaces que afectan el ADN (Leonel & Tonetti, 2021). El tiempo de contacto del ozono es de gran importancia puesto que se ha encontrado que una dosis de 0,5 mg O₃/L durante dos (2) minutos genera daños en la membrana celular, sin embargo, a la misma dosis durante 5 minutos genera una destrucción completa en la membrana de quistes de *Giardia* (Li et al., 2015). Algunos estudios reportan que después de 15 minutos de aplicación de ozono se logra una remoción total de células vegetativas de *C. perfringens* (Voidarou et al., 2007). Asimismo, dosis entre 15-20 mg O₃/L y un tiempo de contacto entre 4 y 9,6 minutos de acuerdo con la calidad del agua residual, puede garantizar efluentes con coliformes fecales que cumplan con la normativa de la OMS (<1000 UFC/ml) (Xu et al., 2002).

La ozonización tiene algunas ventajas en comparación con los otros métodos como producir menos compuestos halogenados en comparación con la cloración (Ren et al., 2019). En estudios realizados en California no se detectaron compuestos tóxicos en el efluente del tratamiento con ozono; la presencia de tóxicos en agua ozonizada puede relacionarse con el uso de aguas residuales industriales para desinfección con este medio (Xu et al., 2002; Zhang et al., 2022).

El ozono tiene una mayor capacidad de oxidación y puede descomponer fracciones orgánicas difíciles de degradar (celulosa, hemicelulosa y lignina), siendo altamente eficiente en la eliminación de

patógenos, color, olor, sabor y algunos metales precipitables (de Souza et al., 2020). Se ha reportado estudios donde existe una disminución significativa en la absorbancia UV₂₅₄ (parámetro relacionado con materia orgánica disuelta) y color en la desinfección de aguas residuales de tratamiento secundario con ozono (Xu et al., 2002).

Otra ventaja de este tratamiento es que por la inestabilidad del ozono no permanece solubilizado en el agua durante un tiempo prolongado y en la mayoría de los casos no produce subproductos tóxicos. Además, su producción se realiza a partir del oxígeno del aire eliminando la necesidad de almacenar productos químicos (Clem & Mendonça, 2022). En la Tabla 7 se resumen algunas ventajas y desventajas de este método.

Tabla 7.

Ventajas y desventajas de la ozonización en desinfección de aguas residuales tratadas.

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> • Producción <i>in situ</i> del ozono. • Alta eficiencia en la remoción de microorganismos. • No requiere productos químicos. • Tiempo de contacto relativamente corto. • Produce menos compuestos químicos en el agua que el cloro. • Concentraciones bajas de ozono son suficientes para la inactivación de microorganismos y patógenos del agua. • Remueve olor, sabor, turbiedad, materia orgánica. • No se ve afectado en gran medida por la turbidez en el agua. 	<ul style="list-style-type: none"> • Inversión inicial alta. • Altos costos en energía eléctrica. • Es necesario una capacitación del personal para su uso. • El ozono es un gas tóxico, por lo que el personal a cargo debe tener cuidados obligatorios al operar el sistema de ozonización.

Nota. Información tomada de (Instituto Mexicano de Tecnología del Agua y el Ministerio de Medio Ambiente y Agua de Bolivia (2018) & de Souza et al. (2020) & Leonel & Tonetti (2021).

Teniendo en cuenta que hay una variedad de alternativas para la desinfección de agua residual tratada, a continuación, se presenta una tabla comparativa general entre los métodos señalados en el presente trabajo (Tabla 8). En general, todos los procesos de desinfección requieren de un tratamiento previo del agua residual, preferiblemente secundario puesto que permite mayor remoción de

contaminantes fisicoquímicos y microbiológicos como se menciona en la Tabla 3; sin embargo, para lograr obtener un agua de reúso para la agricultura de acuerdo con la normativa (Tabla 2), se debe hacer un proceso de desinfección y la ozonización es un proceso prometedor que aunque tiene un alto costo de inversión no requiere de productos químicos almacenados, utiliza aire para obtención de ozono, no genera productos tóxicos para el cultivo al reaccionar con la materia orgánica disuelta que puedan aumentar gastos por la inhibición del crecimiento de frutas y vegetales al utilizar el agua en el riego. Adicionalmente, permite la degradación de compuestos recalcitrantes volviéndolos biodegradables, siendo amigable con los nutrientes como nitrógeno, fósforo y potasio por lo que al utilizar el ozono se mantiene las concentraciones de estos compuestos que aportan nutrientes al cultivo (Martínez et al., 2011).

Tabla 8.

Comparativo de tecnologías para desinfección de aguas residuales tratadas para reúso agrícola.

Ítem	Rayos Ultravioleta (UV)	Ozono	Micro y ultrafiltración con membranas	Cloración
Adición de agentes químicos	No	No	No	Si
Formación de sustancias tóxicas	No	No	No	Si
Es afectado en gran medida por la materia orgánica o sólidos en el agua	Si	No	Si	Si
Remoción de patógenos y microorganismos	Si	Si	Requiere otro proceso de desinfección	Si
Remoción de protozoos	Si	Si	Requiere otro proceso de desinfección	Requiere altas dosis
Inversión inicial alta	Si	Si	Si	No
Altos costos de energía eléctrica	Si	Si	Si	No
Necesita tratamiento previo	Si	Si	Si	Si
Producción <i>in situ</i>	Si	Si	No	No
Capacitación de personal	Si	Si	Si	Si
Necesita mantenimiento	Si	Si	Si	Si
Aporte de nutrientes en cultivos	-	Si	No	No

Cabe mencionar que dentro de la información expresada en la Tabla 2, solamente las normas internacionales incluyen límite de DBO y sólidos suspendidos totales, la norma colombiana no lo incluye. La unión europea, la FAO y EPA son los más estrictos en cuanto a este criterio, puesto que se exigen 10 mg DBO/L, mientras que las demás mencionan un límite de 30 mg DBO/L. Por tal razón, en Colombia se debería evitar el uso de cloro como método de desinfección en la agricultura puesto que existe la posibilidad de utilizar agua tratada con altas cargas de DBO o sólidos que lleven a la formación de subproductos tóxicos, afectando al cultivo y a la salud de los consumidores. Adicionalmente, solamente el reglamento europeo incluye valor límite para la turbiedad (<5 NTU) y es el más estricto para el valor de sólidos suspendidos totales en el agua (10 mg SST/L), por lo que el método UV y cloración podría verse afectado si no se hace un control a estas variables. Esto conlleva a considerar la ozonización como el mejor método para reúso de agua en cultivos, puesto que evita la formación de tóxicos, garantiza la eliminación de patógenos y mantiene los nutrientes con lo que viene el agua residual doméstica.

6.2 Análisis de información sobre la ozonización para reúso de aguas residuales tratadas en el sector agrícola

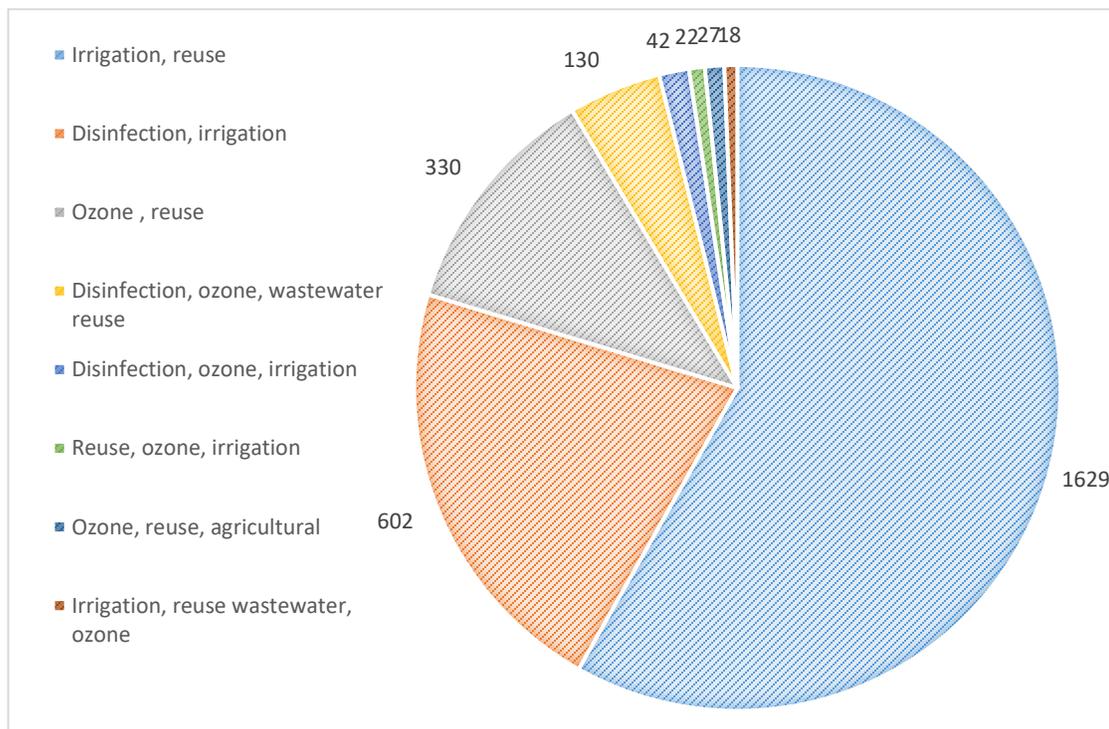
Generalmente el ozono es usado en la industria de procesamiento de alimentos y para el embotellamiento del agua, esto es debido a que se incluyó como GRAS (generalmente reconocido como seguro) por la FDA desde 1997 (Voidarou et al., 2007). Las guías y manuales de organizaciones internacionales como la OMS y EPA describen el ozono como método para la desinfección del agua y obtener parámetros de calidad adecuadas para el reúso en la agricultura y otros usos (EPA, 2012; OMS, 2011). En la ciudad de Almería, (España) se ha utilizado ozono para la desinfección de aguas residual doméstica generando efluentes que cumplen con los criterios de la ley española para el riego de cultivos (Leonel & Tonetti, 2021).

Teniendo en cuenta que desde hace años se habla del reúso de aguas residuales para el riego de cultivos con el fin de disminuir la gran presión de agua que se genera en este sector agrícola (UNESCO, 2019), se realizó una búsqueda en la base de datos de Scopus para conocer cuánta información hay y cómo se encuentra distribuida (año y país de publicación) acerca del reúso de aguas utilizando la desinfección con ozono, puesto que se han mencionado anteriormente las ventajas de este en comparación con los otros métodos.

En la Figura 4 se encuentran las combinaciones de palabras claves utilizadas y la cantidad de documentos obtenidas en la base de datos usada. En la búsqueda se encontró que al utilizar las palabras en ingles riego (irrigation) y reúso (reuse) se obtiene la mayor cantidad de documentos (1629) que con otras combinaciones de palabras. En este grupo aún se evidencia una amplia gama de documentos que incluye efecto del agua residual en los cultivos de diferentes verduras o frutos, estudios de fitorremediación, usos de diferentes métodos de desinfección como filtración, adsorción con carbón activado etc., e incluso encuestas de aceptación de aguas residuales de reúso.

Figura 4.

Cantidad de documentos publicados en Scopus para diferentes combinaciones de palabras clave sobre el ozono en la reutilización de aguas residuales para riego agrícola.



Nota. Información obtenida de Scopus.

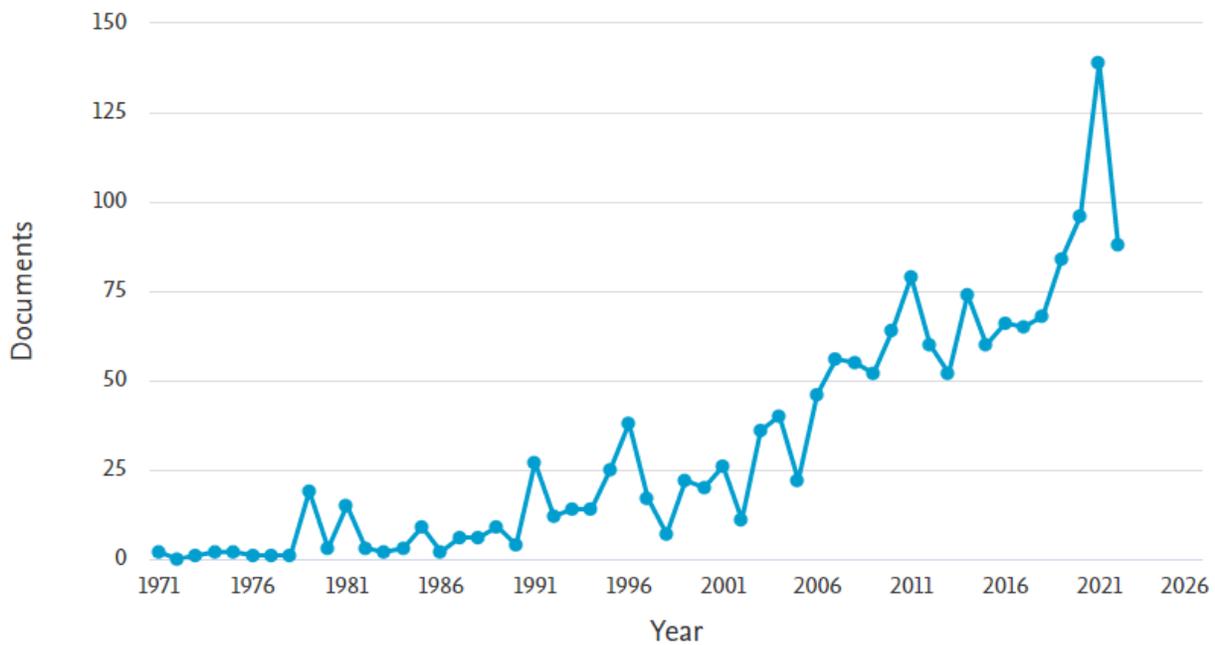
Se observa también en la Figura 4 que a medida que se utilizan palabras más específicas se reduce la cantidad de artículos publicados; cuando se usan las palabras en ingles desinfección (disinfection), ozono (ozone), reúso de agua residual (wastewater reuse) se obtienen más documentos que cuando se cambia la palabra reúso por riego (irrigation). Esto se debe a que se encuentran artículos asociados al reúso de agua con tratamiento de ozono para varios sectores como industrial, alimentos, agua potable y agrícola,

por lo que no es excluyente para el sector agrícola. Por otro lado, al incluirse la palabra riego (irrigation), en con combinación desinfección (disinfection) y ozono (ozone), la cantidad de artículos disminuye significativamente encontrándose solamente entre 42 y 18 documentos de acuerdo con la combinación de palabras usadas.

La documentación sobre el reúso del agua en el riego de cultivos comienza a generarse desde 1971 y ha logrado un mayor aumento luego del 2006 (Figura 5), lo que indica que ha estado creciendo el interés en este tema, posiblemente porque los entes internacionales como la Organización de las Naciones Unidas (ONU) han estado trabajando fuertemente para impulsar la reutilización del agua lo que permite lograr los objetivos de desarrollo sostenible (UNESCO, 2019).

Figura 5.

Cantidad de documentos publicados en relación con los años, usando las palabras “irrigation” y “reuse”.



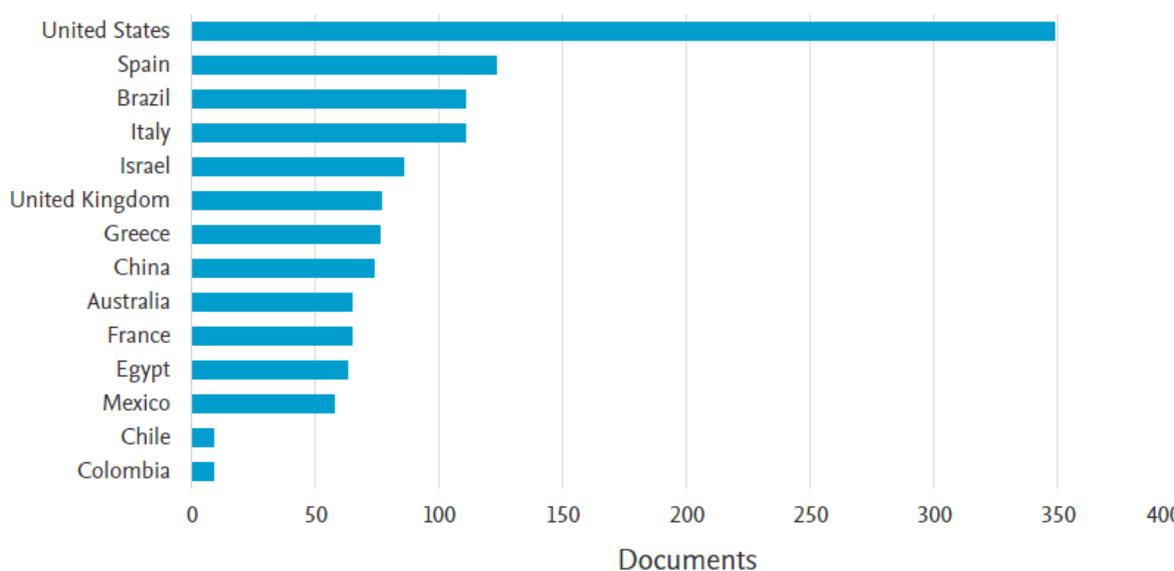
Nota. Gráfico generado en Scopus.

En particular, Estado Unidos es el país con mayor generación de publicaciones en comparación con los demás países -para la combinación de palabras usadas (Figura 6), seguido de España y Brasil, este último es el único país latinoamericano con más de 100 artículos publicados en los años analizados (1971-2022). México, con 54 artículos, se encuentra dentro de los países latinoamericanos con mayores estudios

en cuanto a reúso en el sector agrícola reportados en Scopus. En cuanto a Colombia, sólo se encontraron nueve (9) artículos sobre reúso del agua para riego, relacionado con la poca experiencia de Colombia respecto a reúso puesto que en general se utiliza agua residual cruda para el riego agrícola sin tener los respectivos tratamientos para garantizar la calidad, debido probablemente al desconocimiento de los aspectos conceptuales sobre la reutilización y su normativa, así mismo se genera una subvaloración de las aguas residuales (Galvis et al., 2018).

Figura 6.

Cantidad de documentos reportados en función de los países, usando las palabras “irrigation” y “reuse”.



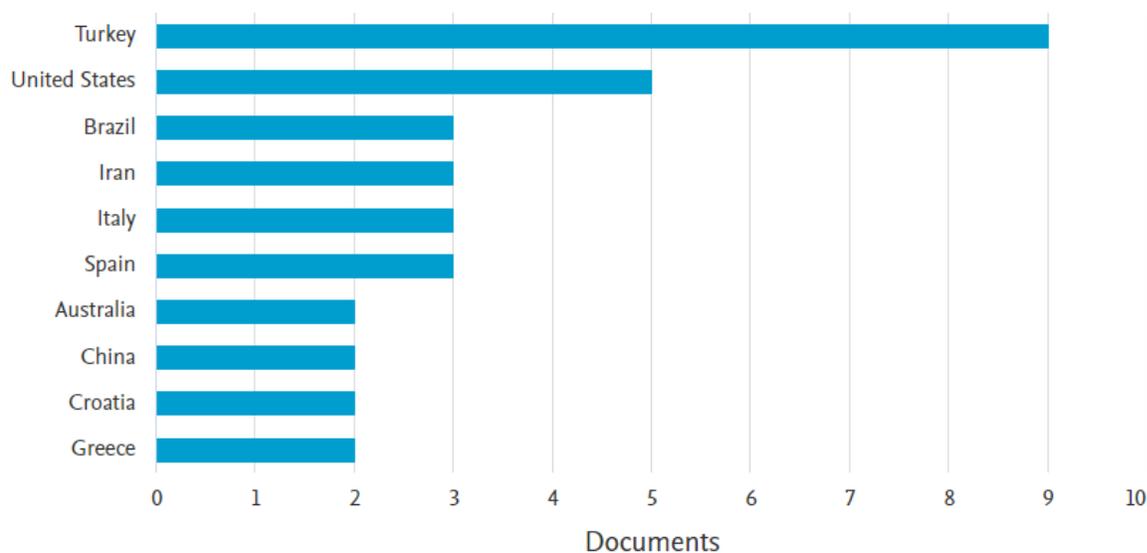
Nota. Gráfico generado en Scopus.

Como se muestra en la Figura 4, es baja la cantidad de artículos sobre el ozono para el tratamiento de aguas de residuales en el sector agrícola. Según lo encontrado en la Figura 7, Turquía cuenta con mayores estudios en este campo en comparación con Estados Unidos, anteriormente se había mencionado que tenía más artículos para otras combinaciones de palabras que excluían “ozono” (Figura 6). En Colombia no se encontraron artículos sobre el ozono en reúso de agua para el riego. Lo encontrado permite concluir que hacen falta mayores esfuerzos en estudiar y publicar sobre la reutilización de aguas residuales y el uso de ozono como método para desinfectar particularmente en Colombia, teniendo en cuenta que gran parte de la economía del país se debe a cultivos de: café, algodón, cacao, caña de azúcar, banano, arroz y papa, por lo que la transferencia de conocimiento y el estudio continuo que permita

mejorar condiciones cuidando el medio ambiente y manteniendo la calidad de los productos podría ser de gran importancia. Cabe resaltar que es necesario realizar una búsqueda bibliográfica más profunda puesto que la realizada en este documento solo tiene en cuenta artículos publicados en Scopus, dejando de lado otras bases de datos internacionales y nacionales.

Figura 7.

Cantidad de documentos reportados en función de los países, usando las palabras “disinfection”, “ozone” e “irrigation”.



Nota. Gráfico generado en Scopus.

7 OZONIZACIÓN PARA LA DESINFECCIÓN DE AGUAS RESIDUALES DOMESTICAS TRATADAS

El ozono se ha convertido en un gran competidor en relación con otros agentes químicos oxidantes utilizados en la desinfección para el abastecimiento de agua potable debido a sus ventajas. Principalmente por su baja cantidad de subproductos generados, además, el uso de la desinfección mediante UV, un método físico, es restringido a gran escala debido a su elevado coste y requerimientos en la infraestructura (Jamalinezhad & Hassani, 2021).

El ozono es una molécula que está compuesta de tres átomos de oxígeno producidos cuando el oxígeno molecular, recolectado del aire, se somete a una alta descarga de energía ocasionando que el doble enlace se rompa y se recombine generando los tres átomos de oxígeno. Este compuesto tiene un

alto potencial de oxidación, aproximadamente 1,5 veces más que los oxidantes de cloro (ozono 2,07 mV, cloro 1,36mV e hipoclorito 1,49 mV); esto lo convierte en un eficiente desinfectante en la inactivación de patógenos y microorganismos (FUDESA, 2020; Voidarou et al., 2007).

Dependiendo del pH el proceso de ozonización sigue dos rutas. A pH bajos, el ozono reacciona directamente con sustancias orgánicas e inorgánicas disueltas (reacción selectiva), por otro lado, a pH básicos el ozono se descompone rápidamente generando radiales libres (OH), lo que generan una mayor y rápida degradación de compuestos orgánicos; por ejemplo, estudios reportan que el aumento de pH favorece la descomposición de colorantes con ozono (Paździor et al., 2017).

La ozonización, aplicada después de tratamientos biológicos y/o acompañados de procesos fisicoquímicos, ha sido considerado un post tratamiento eficiente en comparación con otros métodos de desinfección por factores como: la no formación de compuestos que tengan riesgo sobre la salud humana, la implementación de sistemas de contacto gas-líquido mucho más eficientes, su alto potencial de oxidación y la eliminación de organismos que otros desinfectantes no eliminan como los quistes de *Giardia* y *Cryptosporidium* (Batallar et al., 2010).

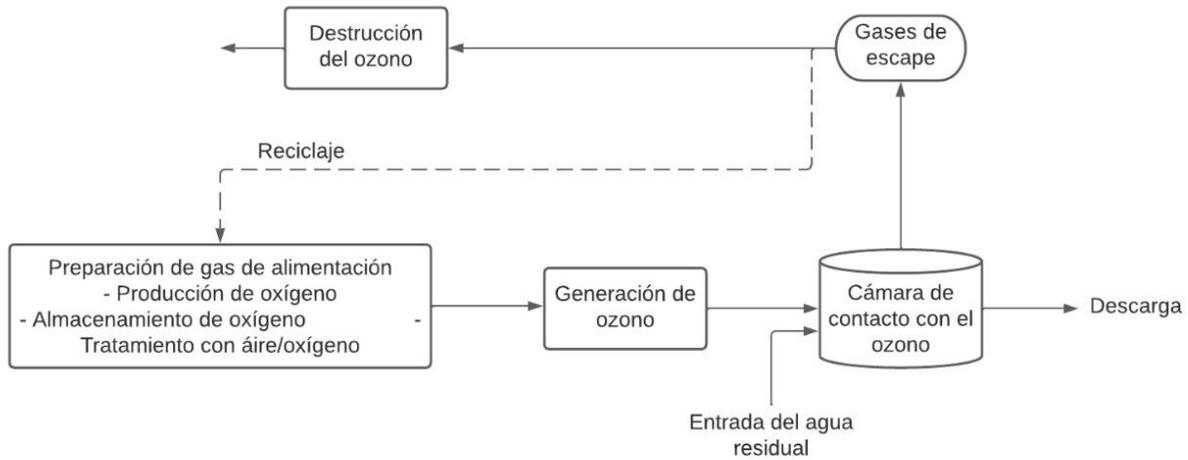
Por la inestabilidad de esta molécula se hace necesario que su generación sea *in situ*; el aire circula a un sistema donde se aplica una concentración de energía o un campo eléctrico con órdenes de 50KV y 1,35KHz, la cual provoca la disociación del oxígeno para generar el ozono. Al atrapar aire troposférico hay que tener en cuenta que su composición en base seca es de 21% oxígeno y 78% de nitrógeno, con 1% de otros compuestos, composición que no varía con la altitud. No obstante, el aumento de la altitud provoca una disminución de la presión atmosférica y, por tanto, una variación en la cantidad de oxígeno (i.e. en el mismo volumen de aire se tendrán menos moléculas de cada uno de los compuestos) (FUDESA, 2020) La corriente de gas que se genera a partir de aire como materia prima contiene entre el 0,5% y 3,0 % de ozono, mientras que al usar oxígeno puro puede llegar a generar entre 2 y 4 veces la concentración generada con aire (EPA, 1999).

7.1 Generación de ozono

El sistema de ozonización se compone de una unidad de preparación de gas, la unidad de generación de ozono, la fuente de energía eléctrica, contactores y la cámara de eliminación de gas en exceso, en la Figura 8 se muestra un esquema donde se puede identificar las partes mencionadas.

Figura 8.

Esquema de un sistema de ozonización.



Nota. Tomado de la EPA (1999).

Las características principales de cada unidad se enuncian a continuación (Rodríguez et al., 2008):

- **Unidad de preparación del gas:** la función es enfriar y secar el gas, depende del tipo de gas que se use ya sea aire u oxígeno puro. Si se usa aire se debe secar hasta un punto de condensación de -65°C y así minimizar la formación de óxidos de nitrógeno. También es importante enfriar el aire, ya que el ozono se descompone rápidamente a temperaturas mayores a 30°C .
- **Unidad generadora de ozono:** la generación de ozono se realiza *in situ* por la inestabilidad de la molécula; actualmente en la industria se hace uso de la descarga corona como método para producir el ozono, estos generadores pueden ser de tipo de tubo, placa de Otto y placa de Lowther.
- **Unidad de fuente de energía eléctrica:** se usan fuentes eléctricas de 50 a 60 Hz y con tensiones $> 20.000\text{ V}$, pero los últimos avances han desarrollado unidades de alta frecuencia entre 1.000 a 2.000 Hz y 10.000 V que son utilizadas para plantas de tratamiento de agua de capacidades más grandes.
- **Unidad de contactores:** unidades para transferir el ozono que es generado al agua residual a desinfectar. Los tipos de contactores tienen una función específica, hay unos de reacciones rápidas, que se usan para realizar la inactivación de microorganismos, oxidación de metales y mejorar los procesos de floculación, y otro de reacciones lentas, aquellas que requieren la oxidación de sustancias más complejas, plaguicidas y sustancias orgánicas lo que requieren un tiempo de contacto más largo.

- **Unidad de eliminación de ozono en exceso:** Normalmente queda una fracción de ozono para purgar o eliminar del sistema, en plantas pequeñas se hace dilución con el aire, pero para plantas grandes es posible realizar descomposición térmica (elevada temperatura a más de 300°C).

Es importante tener en cuenta que la generación de ozono depende de la técnica usada y los equipos utilizados, puesto que están sujetos a los parámetros de diseño como longitud del sistema de descarga, configuración, rendimiento, frecuencia, presión de trabajo, temperaturas de trabajo, composición de gas etc., parámetros que influyen de manera significativa en la eficiencia de la generación.

7.2 Condiciones de operación

En la desinfección del agua residual con ozono se debe maximizar la solubilidad del ozono en el agua, ya que de esto depende la concentración de desinfectante para la inactivación de los microorganismos. Los parámetros de control comúnmente usados en los sistemas con ozono son: dosis, pH y tiempo de contacto. A continuación, se enuncian algunos casos de estudio donde se reportan las dosis y tiempos de contacto utilizados para la remoción de microorganismos al utilizar ozono como desinfectante en aguas residuales para reúso

Tabla 9.

Parámetros de operación en diferentes casos de estudio utilizando ozono como desinfectante.

Tipo de agua	pH	Dosis ozono	Tiempo de contacto	Eliminación de microorganismos	Remoción otros parámetros	Agua usada en agricultura	Referencia
Agua superficial	NE	6,3-6,5 mg/L	NE	> 4 Log UFC/ml <i>E.coli</i> luego del tratamiento	57% en DQO 6% en TOC	Si	(Banach et al., 2021)
Aguas residuales de tratamiento secundario y posteriormente filtradas	7,0-8,0	11-13 mg/L	NE	>3 Log UFC/100ml coliformes fecales luego del tratamiento	34,8 % en DQO	Riego de cultivos en invernaderos	(Martínez et al., 2011)
Aguas residuales de tratamiento secundario y posteriormente filtradas	NE	10-40 mg/L	1-15 min	Máxima dosis: reducción de 4,11 y 3,55 Log coliformes fecales y totales	Remoción -89% de SST, 80,5% de turbidez y 40,7% de DQO	Riego de áreas de acceso restringido y cultivos alimentarios procesados o cultivos no alimentarios	(Jamalinezhad & Hassani, 2021)
NE	6	0,5 mg/L	5 min	Inactivación 2 Log de quistes de <i>Giardia</i>	NE	NE	(Li et al., 2015)
Aguas residuales tratadas en filtro anaerobio seguido por tanque séptico	6,5	7,8 mg/L	60 min	Presencia de 2013 NMP/100 ml coliformes totales	Remoción de DBO de 69% y DQO 47%	Sí	(Clem & Mendonça, 2022)

Tipo de agua	pH	Dosis ozono	Tiempo de contacto	Eliminación de microorganismos	Remoción otros parámetros	Agua usada en agricultura	Referencia
Agua residual de tratamiento secundario (lodos activados)		4-30 mg/L	2-9 min	Dosis de 8,6 mg/L inactiva a <i>Salmonella</i> Inactivación de <i>Clostridium</i> a 0,5 Log Coliformes fecales > 3 Log UFC/100ml	No tóxicos en el efluente	Cumple normativa OMS para riego	(Xu et al., 2002b)

Nota. No especificado (NE)

Adicionalmente, en la Tabla 10 se encuentra un resumen según lo encontrado en la bibliografía con los posibles rangos de operación de los parámetros más significativos o importantes para la desinfección con ozono. Cabe mencionar que cada sistema y tipo de agua debe ser ajustado según las condiciones más favorables, es decir, la dosis y tiempo de contacto puede variar según las características del agua que será tratada. De esta forma es importante conocer el tipo de agua con el que se trabajará y con base en la información de la Tabla 10 ajustar los parámetros según los mejores resultados de remoción.

Tabla 10.

Condiciones de operación para el proceso de desinfección con ozono.

Parámetro	Descripción
pH	5,5 – 9,5
Temperatura	5°C a 35°C
Dosis	5 a 15 mg/L
Tiempo contacto	5-30 min

Nota. Basado de Doménech (2004).

Para el tratamiento con ozonización hay que tener en cuenta que la generación de este implica un alto consumo de energía eléctrica, además de equipos robustos de los cuales se realizan las siguientes recomendaciones de operación y seguridad para mantener controlada la operación del post tratamiento (EPA, 1999):

- No se permiten las fugas dentro o fuera del generador de ozono.
- Revisión periódica de las unidades para evitar fugas.
- Monitoreo de la concentración de ozono.
- Calibración y ajuste de equipos de medición.
- Evitar fugas de ozono a la atmosfera, puesto que este tiene una reactividad alta al alcanzar concentraciones de 240 g/m³.
- Purgar frecuentemente las tuberías del: generador de ozono, distribución, unidad de contacto, gas de escape y la unidad de eliminación.
- Mantener el flujo requerido del enfriador del generador.

7.3 Esquema metodológico de la ozonización como desinfectante para reúso

El esquema metodológico observado en el Anexo busca explicar el proceso para la aplicación de la ozonización en el reúso de agua residual doméstica en el sector agrícola, para lo cual es importante conocer las características iniciales del agua residual y el tipo de tratamiento que tuvo (primario, secundario), teniendo en cuenta las condiciones particulares de la zona y el cultivo y la viabilidad económica del proyecto.

Se recomienda hacer una revisión de las condiciones meteorológicas de la zona, tales como precipitación, evapotranspiración, radiación solar, humedad relativa y temperatura ya que todas estas son variables que influyen directamente en el tipo de actividad agrícola o cultivo a implementar. En lo posible, conocer el tipo de suelo en el cual se va a cultivar y realizar el riego, teniendo en cuenta características físicas (estructura, textura y composición), químicas (pH, conductividad, RAS, contenido de nutrientes, etc.) e hidrodinámicas (conductividad hidráulica y composición) para determinar el estado del suelo ya que cada cultivo puede tener diferentes requerimientos nutricionales.

Se debe revisar el método de riego a usar, entre los cuales se tiene principalmente el riego de superficie (menos eficiente pero más económico), el riego por aspersion (más eficiente pero con mayor costo que el de superficie) y localizado (aspersión por goteo, es el más preciso y eficiente de los tres), de los cuales el ultimo tiene mayores requerimiento de calidad en cuanto a la turbiedad y cantidad de solidos suspendidos, debido a que la presencia de estos parámetros puede generar taponamiento de las boquillas. Para la selección del método de riego se recomienda realizar un análisis costo/beneficio, ya que el primer método, a pesar de ser el más económico, es poco eficiente, y la mayor parte del agua de reúso posiblemente se pierda por infiltración y no se aprovecha adecuadamente. Por lo tanto, se debe seleccionar el método teniendo en cuenta la calidad del agua tratada, las limitaciones del tipo de cultivo y el alcance del proyecto.

Posteriormente se debe identificar el tipo de tratamiento al cual fue sometido el agua residual a desinfectar (primario y secundario), así como sus características fisicoquímicas y microbiológicas, con la finalidad de verificar si estos tratamientos permiten una calidad del agua adecuada para realizar la implementación de la ozonización; esta calidad de agua debe ser tal que no se presenten interferencias en la desinfección, pues un agua residual con alta cantidad de solidos suspendidos puede generar interferencia y elevar las dosis de ozono requeridas.

Para la aplicación de la ozonización es fundamental tener en cuenta aspectos como el tipo de gas a utilizar, los tipos de generadores, los componentes del sistema y las condiciones de operación necesarios según el tipo de aguas residuales, aspectos que fueron tratados en detalle con anterioridad.

Partiendo de unas condiciones adecuadas en el tratamiento secundario, también es importante conocer la normativa que se debe cumplir con respecto al reúso de aguas residuales en el sector agrícola. Para Colombia, la normatividad vigente es la Resolución 1256 del 2021, sin embargo, según la envergadura del proyecto, es posible requerir del cumplimiento de normativas internacionales como las de la FAO o la EPA, las cuales están clasificadas según el tipo de contacto, ya que se requiere una mayor calidad microbiológica para productos que se consumen directamente que otro tipo de productos que tienen un proceso de intermediario antes de llegar al consumidor final.

Si llegado el caso no se logra una calidad adecuada en el agua desinfectada se recomienda mejorar parámetros en el tratamiento primario y secundario de las aguas residuales, el cual permita obtener mejores condiciones del agua antes de la desinfección; si, por el contrario, se logran cumplir los criterios establecidos en la normativa entonces será viable el uso del ozono en el reúso de agua residual doméstica en el sector agrícola.

Cabe resaltar que el proyecto también debe tener en cuenta la viabilidad económica, por lo cual esta tercera condición debe revisar el proyecto en términos de costo del agua de reúso contra el costo del agua y productos de fertilización, la relación costo-beneficio y la posible obtención de beneficios en términos económicos que puedan existir en cada país para la incentivar este tipo de aplicaciones.

El esquema (Anexo) busca aportar en la transmisión de información a los agricultores brindando una referencia en general o primer acercamiento para usar el ozono como desinfectante de agua residual tratada y poder dar un reúso al agua de manera adecuada teniendo en cuenta los riesgos en la salud que pueden generarse si llegase a dar un mal uso.

8 CONCLUSIONES

- Los criterios de calidad de las diferentes normativas sobre el agua de reúso para riego agrícola es muy semejante entre los países evaluados en este estudio, posiblemente debido a que la mayoría siguen utilizando como referencia los valores planteados por la OMS y FAO hace más de 20 años. Estas entidades cuentan con categorías de calidad para los diferentes tipos de cultivos por lo que algunos países han implementado el mismo tipo de restricciones, incluso en cuanto a parámetros microbiológicos la EPA, México y la Unión Europea cuentan con los valores más restrictivos para el riego de cultivos de contacto directo. Sin embargo, esto no pasa igual para Colombia, donde la nueva resolución del 2021 no diferencia entre la calidad de agua para cada tipo de cultivo y continúa utilizando criterios de la OMS, además, se omite valores de helmintos como criterio de cumplimiento, teniendo en cuenta que estos están asociados a riesgos de salud pública. Según lo encontrado en esta revisión Colombia tiene una de las normativas menos restrictivas a nivel microbiológicos sobre el reúso de agua en el sector agrícola, haciéndose necesario el estudio epidemiológico para corroborar si al realizar riego de cultivos con agua de reúso de acuerdo con la norma se puede encontrar efectos en la salud humana.
- La normatividad a nivel nacional ha tenido una reciente evolución, inicialmente los lineamientos del reúso de aguas residuales en Colombia estaban dictaminados por la Resolución 1207 del 2014 la cual era considerada por los sectores económicos del país como una norma estricta que podría desincentivar la aplicación del reúso ya que prohibía la valorización de las aguas residuales tratadas, sin embargo, esta fue derogada por la Resolución 1256 del 2021, la cual a pesar de que si permite dicha valorización y elimino algunos parámetros, deja por fuera muchas potenciales actividades aptas para hacer uso de aguas residuales tratadas, no se establece criterios de calidad claros para las actividades industriales, imponen trámites y requisitos técnicos complejos, y se excluyen análisis microbiológicos como los helmintos que han sido descritos desde hace años como microorganismos de control en el agua para evitar enfermedades.
- La ozonización aplicada como tratamiento terciario de las aguas residuales domésticas permite realizar una desinfección eficiente y segura, debido a que para este tipo de aguas no se da la formación de subproductos tóxicos, siendo un método interesante que puede reemplazar métodos convencionales como la cloración, que en presencia de materia orgánica puede generar compuestos cancerígenos.
- Puesto que la economía colombiana se basa en gran medida en la agricultura se recomienda ampliar los estudios del uso de ozono para desinfección de aguas residuales con el fin de promover la

educación de este tipo de desinfectante y encontrar parámetros óptimos operativos para su aplicación en el sector.

- Por medio del esquema metodológico para la aplicación de la ozonización en el reúso de agua residual doméstica en el sector agrícola, se logra la integración de los principales factores requeridos para su implementación, este permite evidenciar la importancia de la articulación de las condiciones específicas del sitio, los sistemas de tratamientos aplicados, la normatividad y la relación costo – beneficio para llevar a cabo de forma satisfactoria un proyecto de ozonización destinado al reúso de aguas residuales domésticas en el sector agrícola.

9 REFERENCIAS

- Adeyemo, F. E., Singh, G., Reddy, P., Bux, F., & Stenström, T. A. (2019). Efficiency of chlorine and UV in the inactivation of *Cryptosporidium* and *Giardia* in wastewater. *PLOS ONE*, *14*(5), e0216040. <https://doi.org/10.1371/JOURNAL.PONE.0216040>
- Agencia Europea de Medio Ambiente. (2018). *Consumo de agua en Europa: grandes problemas de índole cuantitativa y cualitativa*. <https://www.eea.europa.eu/es/senales/senales-2018-el-agua-es-vida/articulos/consumo-de-agua-en-europa>
- Amori, P. N., Mierzwa, J. C., Bartelt-Hunt, S., Guo, B., & Saroj, D. P. (2022). Germination and growth of horticultural crops irrigated with reclaimed water after biological treatment and ozonation. *Journal of Cleaner Production*, *336*(May 2021), 130173. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.130173>
- Autoridad Nacional del Agua. (2016). Manual de buenas prácticas para el uso seguro y productivo de las aguas residuales domésticas | Drupal. *Biblioteca Del Perú*. <https://www.ana.gob.pe/publicaciones/manual-de-buenas-practicas-para-el-uso-seguro-y-productivo-de-las-aguas-residuales>
- Banach, J. L., Hoffmans, Y., Appelman, W. A. J., van Bokhorst-van de Veen, H., & van Asselt, E. D. (2021). Application of water disinfection technologies for agricultural waters. *Agricultural Water Management*, *244*, 106527. <https://doi.org/10.1016/J.AGWAT.2020.106527>
- Batallar, M. O., Fernandez, L. A., & Vèliz, E. (2010). Eficiencia y sostenibilidad del empleo del ozono en la gestión de los recursos hídricos. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, *26*(1), 85–95. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-49992010000100007&lng=es&nrm=iso&tlng=es
- Beck, S. E., Suwan, P., Rathnayeke, T., Nguyen, T. M. H., Huanambal-sovero, V. A., Boonyapalanant, B., Hull, N. M., & Koottatep, T. (2021). Woven-Fiber Microfiltration (WFMF) and Ultraviolet Light Emitting Diodes (UV LEDs) for Treating Wastewater and Septic Tank Effluent. *Water* *2021*, Vol. 13, Page 1564, *13*(11), 1564. <https://doi.org/10.3390/W13111564>
- Clem, V., & Mendonça, H. V. de. (2022). Ozone reactor combined with ultrafiltration membrane: A new tertiary wastewater treatment system for reuse purpose. *Journal of Environmental Management*, *315*, 115166. <https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2022.115166>

- Colombia. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2014). *Resolución 1207 de 2014 - Por la cual se adoptan disposiciones relacionadas con el uso de aguas residuales tratadas*. https://fenavi.org/wp-content/uploads/2018/05/Resoluci%C3%B3n_1207_2014-Reuso-aguas-tratadas-1.pdf
- Colombia. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2021). *Resolución 1256 de 2021 – Por la cual se reglamenta el uso de las aguas residuales y se adoptan otras disposiciones*. <https://acmineria.com.co/normativa/resolucion-mads-1256-de-2021-reglamenta-el-uso-de-las-aguas-residuales/>
- de Souza, D. S., Maciel, A. M., Otenio, M. H., & de Mendonça, H. V. (2020). Optimization of Ozone Application in Post-Treatment of Cattle Wastewater from Organic Farms. *Water, Air, and Soil Pollution*, 231(7), 1–10. <https://doi.org/10.1007/S11270-020-04736-2/TABLES/3>
- Departamento Nacional de Planeación. (2019). *Plan Nacional de Desarrollo 2018-2022*. www.dnp.gov.co
- Desinfección y Sanitización mediante Ozono*. (n.d.). Retrieved November 6, 2022, from <http://www.cryogas.com.co/Mobile/co/Menu/1512>
- Domenech, E., Amorós, I., Moreno, Y., & Alonso, J. L. (2018). Cryptosporidium and Giardia safety margin increase in leafy green vegetables irrigated with treated wastewater. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, 221(1), 112–119. <https://doi.org/10.1016/J.IJHEH.2017.10.009>
- Doménech, J. (2004). Ozono frente a cloro. *Offarm*, 23(5), 120–126. <https://www.elsevier.es/es-revista-offarm-4-articulo-ozono-frente-cloro-13061803>
- Dong, S., Li, J., Kim, M. H., Park, S. J., Eden, J. G., Guest, J. S., & Nguyen, T. H. (2017). Human health trade-offs in the disinfection of wastewater for landscape irrigation: microplasma ozonation vs. chlorination. *Environmental Science: Water Research & Technology*, 3(1), 106–118. <https://doi.org/10.1039/C6EW00235H>
- EPA. (1999). *Folleto informativo de tecnología de aguas residuales - Desinfección con ozono EPA 832-F-99-063*.
- EPA. (2004). *Guidelines for Water Reuse*. <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPDF.cgi/30006MKD.PDF?Dockey=30006MKD.PDF>
- EPA. (2006). *Ultraviolet disinfection guidance manual for the final long term 2 enhanced surface water treatment rule*. <https://acortar.link/bVIopv>

- EPA. (2012). *2012 Guidelines for Water Reuse*.
- España. Ministerio de Presidencia. (2007). *Real Decreto 1620/2007, de 7 de diciembre, por el que se establece el régimen jurídico de la reutilización de las aguas depuradas*. <https://www.boe.es/buscar/pdf/2007/BOE-A-2007-21092-consolidado.pdf>
- FAO. (1992). *Wastewater treatment and use in agriculture*. 125.
- FAO. (2017). Water for Sustainable Food and Agriculture: A report produced for the G20 Presidency of Germany. *Food and Agriculture Organization of the United Nations*, 1–33. www.fao.org/publications
- Farhadkhani, M., Nikaeen, M., Yadegarfar, G., Hatamzadeh, M., Pourmohammadbagher, H., Sahbaei, Z., & Rahmani, H. R. (2018). Effects of irrigation with secondary treated wastewater on physicochemical and microbial properties of soil and produce safety in a semi-arid area. *Water Research*, 144, 356–364. <https://doi.org/10.1016/J.WATRES.2018.07.047>
- FUDESA. (2020). *Esterilización de áreas y elementos por la acción combinada de ozono y ultravioleta – FUDESA*. <https://fudesa.org.ar/2020/04/08/esterilizacion-de-areas-y-elementos-por-la-accion-combinada-de-ozono-y-ultravioleta/>
- Galvis, A., Jaramillo, M. F., van der Steen, P., & Gijzen, H. J. (2018). Financial aspects of reclaimed wastewater irrigation in three sugarcane production areas in the Upper Cauca river Basin, Colombia. *Agricultural Water Management*, 209, 102–110. <https://doi.org/10.1016/J.AGWAT.2018.07.019>
- Gatta, G., Libutti, A., Beneduce, L., Gagliardi, A., Disciglio, G., Lonigro, A., & Tarantino, E. (2016). Reuse of treated municipal wastewater for globe artichoke irrigation: Assessment of effects on morpho-quantitative parameters and microbial safety of yield. *Scientia Horticulturae*, 213, 55–65. <https://doi.org/10.1016/J.SCIENTA.2016.10.011>
- Iagua. (2016). *Desarrollan una técnica de ozonización para el tratamiento de aguas residuales*. <https://www.iagua.es/noticias/costa-rica-mexico/conacyt/16/08/31/desarrollan-tecnica-ozonizacion-tratamiento-aguas>
- IDEAM. (2010). *Estudio del Agua*.
- IDEAM. (2018). Evaluación Nacional del Agua 2018. In *Cartilla ENA 2018*.
- Instituto Mexicano de Tecnología del Agua y el Ministerio de Medio Ambiente y Agua de Bolivia. (2018). *Guía Técnica para el reúso de aguas residuales en la agricultura*. www.mmaya.gob.bo

- Jamalinezhad, M., & Hassani, A. H. (2021). Performance evaluation of ultraviolet radiation and ozone disinfection for municipal secondary effluent reuse (Case study in isfahan north wastewater treatment plant). *Desalination and Water Treatment*, 223. <https://acortar.link/38yDy0>
- Leonel, L. P., & Tonetti, A. L. (2021). Wastewater reuse for crop irrigation: Crop yield, soil and human health implications based on giardiasis epidemiology. *Science of The Total Environment*, 775, 145833. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2021.145833>
- Li, Y., Smith, D. W., & Belosevic, M. (2015). Morphological changes of Giardia lamblia cysts after treatment with ozone and chlorine. *Https://Doi.Org/10.1139/S04-011*, 3(6), 495–506. <https://doi.org/10.1139/S04-011>
- Lonigro, A., Montemurro, N., & Laera, G. (2017). Effects of residual disinfectant on soil and lettuce crop irrigated with chlorinated water. *Science of The Total Environment*, 584–585, 595–602. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2017.01.083>
- Lorenzo, E. V., Ocaña, J. G. L., Fernández, L. A., & Venta, M. B. (2009). Reúso de aguas residuales domésticas para riego agrícola. Valoración crítica. *Revista CENIC Ciencias Biológicas*, 40(1), 035–044. <https://revista.cnice.edu.cu/index.php/RevBiol/article/view/715>
- Lui, G. Y., Roser, D., Corkish, R., Ashbolt, N., Jagals, P., & Stuetz, R. (2014). Photovoltaic powered ultraviolet and visible light-emitting diodes for sustainable point-of-use disinfection of drinking waters. *Science of The Total Environment*, 493, 185–196. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2014.05.104>
- Mara, D., & Cairncross, S. (1990). Directrices para el uso sin riesgos de aguas residuales y excretas en agricultura y acuicultura, medidas de protección de la salud pública. *Ginebra: Organización Mundial de La Salud*.
- Martínez, S. B., Pérez-Parra, J., & Suay, R. (2011). Use of Ozone in Wastewater Treatment to Produce Water Suitable for Irrigation. *Water Resources Management*, 25(9), 2109–2124. <https://doi.org/10.1007/s11269-011-9798-x>
- Mayra Bataller, S. S. C. M. A. G. (2010). *El ozono: una alternativa sustentable en el tratamiento poscosecha de frutas y hortalizas*. Revista CENIC. <https://biblat.unam.mx/es/revista/revista-cenic-ciencias-biologicas/articulo/el-ozono-una-alternativa-sustentable-en-el-tratamiento-poscosecha-de-frutas-y-hortalizas>
- Metcalf & Eddy. (2013). *Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery*. <https://books.google.com.cu/books?id=6KVKMAEACAAJ>

- México. Secretaría de Medio Ambiente Recursos Naturales y Pesca. (1997). *Norma NOM-003-ECOL-1997- Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reusen en servicios al público.*
- Ministerio de Agricultura y Riego. (2016). Manual de buenas prácticas para el uso seguro y productivo de las aguas residuales domésticas. *Biblioteca Del Perú.*
- OMS. (2011). Guías para la calidad del agua de consumo humano: cuarta edición que incorpora la primera adenda. *Organización Mundial de La Salud, 4*, 608. <https://bit.ly/7FYT>
- Paździor, K., Wrębiak, J., Klepacz-Smółka, A., Gmurek, M., Bilińska, L., Kos, L., Sójka-Ledakowicz, J., & Ledakowicz, S. (2017). Influence of ozonation and biodegradation on toxicity of industrial textile wastewater. *Journal of Environmental Management, 195*, 166–173. <https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2016.06.055>
- Peña, A., Delgado-Moreno, L., & Antonio Rodríguez-Liébana, J. (2019). A review of the impact of wastewater on the fate of pesticides in soils: Effect of some soil and solution properties. *Science of the Total Environment*. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134468>
- Perú. Ministerio de Agricultura y Riego. (2020). *Decreto Supremo n°-2020-MINAGRI -Que establece los niveles de calidad del agua residual tratada con fines de reúso agrario.* <https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/1286893/PROYECTO%20DE%20DECRETO%20SUPREMO.pdf>
- Ramo, A., del Cacho, E., Sánchez-Acedo, C., & Quílez, J. (2017). Occurrence and genetic diversity of *Cryptosporidium* and *Giardia* in urban wastewater treatment plants in north-eastern Spain. *Science of The Total Environment, 598*, 628–638. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2017.04.097>
- Ren, Y., Kong, J., Xue, J., Shi, X., Li, H., Qiao, J., & Lu, Y. (2019). Effects of ozonation on the activity of endotoxin and its inhalation toxicity in reclaimed water. *Water Research, 154*, 153–161. <https://doi.org/10.1016/J.WATRES.2019.01.051>
- Rizzo, L., Gernjak, W., Krzeminski, P., Malato, S., Mc Ardell, C. S., Perez, J. A. S., Schaar, H., & Fattakassinos, D. (2020). Best available technologies and treatment trains to address current challenges in urban wastewater reuse for irrigation of crops in EU countries. *Science of The Total Environment, 710*, 136312. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2019.136312>
- Rizzo, L., Selcuk, H., Nikolaou, A. D., Meriç Pagano, S., & Belgiorno, V. (2014). A comparative evaluation of ozonation and heterogeneous photocatalytic oxidation processes for reuse of

- secondary treated urban wastewater. *New Pub: Balaban*, 52(7–9), 1414–1421. <https://doi.org/10.1080/19443994.2013.787953>
- Rodríguez, A., Rosal, R., Perdígón-Melón, J. A., Mezcua, M., Agüera, A., Hernando, M. D., Letón, P., Fernández-Alba, A. R., & García-Calvo, E. (2008). *Ozone-Based Technologies in Water and Wastewater Treatment*. 127–175. https://doi.org/10.1007/978-3-540-79210-9_4
- Rodríguez, D. J., Serrano, H. A., Delgado, A., Nolasco, D., & Saltiel, G. (2020). *De residuo a recurso Cambiando paradigmas para intervenciones más inteligentes para la gestión de aguas residuales en América Latina y el Caribe*. www.worldbank.org/
- Sala-garrido, R., Molinos-senante, M., Fuentes, R., & Hernández-, F. (2020). Reutilización de agua : estado actual y perspectivas. *Fedea*, 187–204.
- Savchenko, O. M., Kecinski, M., Li, T., & Messer, K. D. (2019). Reclaimed water and food production: Cautionary tales from consumer research. *Environmental Research*, 170, 320–331. <https://doi.org/10.1016/J.ENVRES.2018.12.051>
- Silva, J., Torres, P., & Madera, C. (2008). Reuso de aguas residuales domésticas en agricultura. Una revisión. *Agronomía Colombiana*, 26(2), 347–359. <https://revistas.unal.edu.co/index.php/agrocol/article/view/13521>
- Singh, A. (2021). A review of wastewater irrigation: Environmental implications. *Resources, Conservation and Recycling*, 168, 105454. <https://doi.org/10.1016/J.RESCONREC.2021.105454>
- Soderberg, C. A. (2016). Guías de EPA-2012 para la reutilización de aguas residuales para la agricultura. *A Reutilización de Aguas Residuales Para La Agricultura*, 13–21. https://documento.uagm.edu/cupey/perspectivas/p_perspectivas_5_guias.pdf
- Tortajada, C. (2020). Contributions of recycled wastewater to clean water and sanitation Sustainable Development Goals. *Npj Clean Water* 2020 3:1, 3(1), 1–6. <https://doi.org/10.1038/s41545-020-0069-3>
- UNESCO. (2019). Informe mundial de las Naciones Unidas sobre el desarrollo de los recursos hídricos 2019: no dejar a nadie atrás. *Organización de Las Naciones Unidas Para La Educación, La Ciencia y La Cultura*, 215. <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000367304>
- Unión Europea. Parlamento Europeo y Consejo de la Unión Europea. (2020). *Reglamento (UE) 2020/741 del Parlamento Europeo y Consejo del 2020 - Relativo a los requisitos mínimos para la reutilización del agua*.

- Voidarou, C., Tzora, A., Skoufos, I., Vassos, D., Galogiannis, G., Alexopoulos, A., & Bezirtzoglou, E. (2007). Experimental effect of ozone upon some indicator bacteria for preservation of an ecologically protected watery system. *Water, Air, and Soil Pollution*, 181(1–4), 161–171. <https://doi.org/10.1007/S11270-006-9287-7/FIGURES/11>
- World Health Organization. (1989). *Directrices Sanitarias sobre el Uso de Aguas Residuales en Agricultura y Acuicultura : Informe de un Grupo de Estudio de la OMS*. 90–90.
- World Health Organization. (2018). Guidelines On Sanitation and Health. *World Health Organization*, 1–220. http://www.who.int/water_sanitation_health/publications/guidelines-on-sanitation-and-health/en/
- Xu, P., Janex, M. L., Savoye, P., Cockx, A., & Lazarova, V. (2002a). Wastewater disinfection by ozone: main parameters for process design. *Water Research*, 36(4), 1043–1055. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(01\)00298-6](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(01)00298-6)
- Xu, P., Janex, M. L., Savoye, P., Cockx, A., & Lazarova, V. (2002b). Wastewater disinfection by ozone: main parameters for process design. *Water Research*, 36(4), 1043–1055. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(01\)00298-6](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(01)00298-6)
- Zhang, X. Y., Du, Y., Lu, Y., Wang, W. L., & Wu, Q. Y. (2022). Characteristics of the formation and toxicity index of nine newly identified brominated disinfection byproducts during wastewater ozonation. *Science of The Total Environment*, 824, 153924. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2022.153924>

