




## Reutilización de aguas tratadas en el combate de incendios forestales en Quito: implicaciones para la seguridad y salud ocupacional y sostenibilidad operativa de brigadas de emergencia.

*Reuse of Treated Water in Forest Firefighting in Quito and Its Implications for Occupational Safety, Health, Environmental Management, and the Operational Sustainability of Emergency Brigades.*

Jonnathan David López Rodríguez<sup>1</sup> 

[jdlopez@itsoriente.edu.ec](mailto:jdlopez@itsoriente.edu.ec)

**Instituto Superior Tecnológico Oriente (ITSO)**

Riobamba, Ecuador

Benjamín Gabriel Quito Cortez<sup>2</sup> 

[benjaminquito@bqc.com.ec](mailto:benjaminquito@bqc.com.ec)

**Instituto Superior Tecnológico Oriente (ITSO)**

Riobamba, Ecuador

Daniela Fernanda Vásconez Duchicela<sup>3</sup> 

[danielavasconez@bqc.com.ec](mailto:danielavasconez@bqc.com.ec)

**Instituto Superior Tecnológico Oriente (ITSO)**

Riobamba, Ecuador

Recepción: 05-01-2026

Aceptación: 09-02-2026

Publicación: 30-03-2026

**Como citar este artículo:** López, J. Quito, B. Vásconez, D. (2026). **Reutilización de aguas tratadas en el combate de incendios forestales en Quito: implicaciones para la seguridad y salud ocupacional y sostenibilidad operativa de brigadas de emergencia.** *Metrópolis. Revista de Estudios Globales Universitarios*, 7 (1), pp. 1865-1911.

<sup>1</sup> Tecnólogo en seguridad y salud ocupacional. Instituto Superior Tecnológico Oriente (ITSO).

<sup>2</sup> Abogado, Magister en Educación (Universidad Bicentenario de Aragua) Venezuela, Magister en Ciencias Gerenciales (Universidad internacional del caribe y América latina) Curacao, Doctor en Ciencias de la Educación PHD (UBA) Venezuela, Doctor en Ciencias Gerenciales PHD (universidad internacional del caribe y América latina) Curacao, Postdoctorado en Ciencias de la Educación (UBA) Venezuela.

<sup>3</sup> Ingeniera Mecánica mención Automotriz (Universidad Tecnológica América), Magister en Talento Humano (Universidad Internacional SEK), Magister en Administración de Empresas (Universidad Internacional del Ecuador), Doctor en Ciencias de la Educación PHD por la Universidad Bicentenario de Aragua, Venezuela.





### Resumen

La creciente frecuencia e intensidad de los incendios forestales, sumada a la crisis hídrica que afecta a Ecuador, plantea la necesidad de explorar alternativas sostenibles para la gestión del recurso agua en situaciones de emergencia. En este contexto, el presente estudio tiene como objetivo analizar la viabilidad del uso de aguas residuales tratadas en el combate de incendios forestales en Quito. La investigación se desarrolló mediante un enfoque cualitativo, basado en una revisión bibliográfica sistemática de literatura científica reciente, normativa internacional y nacional, y documentos técnicos relacionados con la reutilización de aguas tratadas, la gestión de incendios forestales y la seguridad y salud ocupacional. El análisis permitió identificar los principales riesgos físicos, biológicos y químicos asociados al uso de aguas residuales tratadas en operaciones de extinción, así como los beneficios operativos derivados de la reducción del consumo de agua potable y la mejora de la resiliencia hídrica en contextos de sequía. Los resultados evidencian que el uso de aguas residuales tratadas es técnicamente viable siempre que se cumplan parámetros estrictos de calidad del agua, se implementen protocolos específicos de bioseguridad y se fortalezca la capacitación del personal. No obstante, se identifican vacíos normativos en el marco legal que limitan su aplicación en escenarios de emergencia. En conclusión, la reutilización de aguas tratadas representa una estrategia sostenible y pertinente para el combate de incendios forestales en Quito, siempre que se integre en un marco regulatorio claro, con énfasis en la protección de la salud ocupacional y la gestión integral del riesgo. **Palabras clave:** aguas residuales tratadas; incendios forestales; seguridad y salud ocupacional; sostenibilidad hídrica; brigadas de emergencia.

### Abstract

The increasing frequency and intensity of forest fires, together with the ongoing water crisis affecting Ecuador, highlights the urgent need to explore sustainable and innovative alternatives for water resource management during emergency situations. In this context, this study aims to analyze the feasibility of using treated wastewater in forest firefighting operations in Quito, considering its implications for the occupational safety and health of emergency brigades, its contribution to operational sustainability and environmental protection. The research was conducted using a qualitative methodological approach, based on a systematic review of recent scientific literature, international guidelines, national regulations, and technical documents related to treated wastewater reuse, forest fire management, climate change adaptation, and occupational health and safety standards. This comprehensive analysis made it possible to identify the main physical, biological, chemical risks associated with, including potential exposure to pathogens, chemical contaminants, which may affect firefighters' health if not properly managed. At the same time, the study highlights significant operational benefits, such as the reduction of potable water consumption, improved availability of water resources during prolonged emergencies, and increased resilience in drought-prone and water-stressed contexts. The results indicate that the use of treated wastewater is technically feasible, provided that strict water quality parameters are met, and continuous training of emergency personnel is strengthened. However, regulatory and institutional the current Ecuadorian legal framework, which limit the formal application of treated wastewater in emergency response scenarios. In conclusion, treated wastewater reuse represents a sustainable, viable, and relevant strategy for forest fire suppression in Quito, it is supported by a clear





regulatory. **Keywords:** treated wastewater; forest fires; occupational health and safety; water sustainability; emergency brigades.

## Introducción.

En las últimas décadas, los incendios forestales han asumido un rol cada vez más crítico en la dinámica ambiental de América Latina, el cual se ha intensificado como consecuencia del cambio climático, la expansión de la frontera agrícola, las quemadas no controladas y los prolongados periodos de sequía (United Nations Office for Disaster Risk Reduction, UNDRR, 2023).

En Ecuador, hasta septiembre de 2024, se han perdido más de 16.000 hectáreas de ecosistemas forestales por incendios (Acción Ecológica, 2024). Además, se ha sumado hasta el 25 de noviembre seis personas fallecidas, 46 heridos y 251 damnificados a causa de los múltiples siniestros forestales que han alcanzado a 22 provincias y que han devastado un número récord de cobertura vegetal (García, 2024).

A este problema se suma la crisis hídrica que afecta a Ecuador y gran parte de Latinoamérica, dado que, las fuentes naturales de agua de la región (ríos, embalses, acuíferos) están experimentando una drástica reducción de sus niveles, en parte debido a la disminución de las precipitaciones, pero principalmente al aumento de la demanda humana e industrial (Insausti & Escobar, 2024). También se ha señalado que, algunas de los glaciares de menor altitud de los Andes tropicales podrían perder entre el 78 % y el 97 % de su volumen hacia el final del siglo (UNESCO, 2024).

En la capital de Ecuador, la Empresa Pública Metropolitana de Agua Potable y Alcantarillado (EPMAPS, 2024) ha advertido se atraviesa un período de sequía, estableciendo su preocupación sobre el suministro de agua a largo plazo, también han señalado que el uso de agua potable para fines no





prioritarios, resulta insostenible a largo plazo. En este sentido, el uso de agua tratada para extinguir incendios podría considerarse una solución innovadora; sin embargo, es necesario evaluarla cuidadosamente antes de adoptarla para combatir incendios, especialmente en lo que respecta a la seguridad y la salud de los operadores.

Esta investigación plantea entonces la siguiente pregunta de estudio: ¿De qué modo la implementación de programas de reutilización de aguas tratadas en el combate de incendios forestales mejora la seguridad y salud ocupacional de las brigadas de emergencia, al tiempo que contribuye a la sostenibilidad operativa en Quito?

Para responder a esta pregunta, se empleará un enfoque cualitativo, que incluye la revisión de documentos que abarcan las normas y regulaciones internacionales sobre el reciclaje de agua, recursos hídricos disponibles, la infraestructura y los procedimientos de emergencia, lo cual permitirá analizar la viabilidad técnica del potencial del uso de agua reciclada. Además, brindará información sobre el efecto que dicho programa podría tener en la salud y la seguridad del personal involucrado, así como en la continuidad operativa general de los sistemas de gestión de emergencias.

## **Marco Teórico.**

A nivel internacional, la organización mundial de la salud, OMS, plantea un enfoque de gestión de riesgos basado en la reducción de carga microbiana, control de contaminantes químicos, gestión de rutas de exposición y establecimiento de objetivos de salud (DALYs) para usos de reutilización potable (EPA, 2023). La Directiva Marco del Agua de la UE (2020) y la norma ISO 16075 (2020) establecen normas de calidad y procedimientos técnicos para los usos no potables del agua tratada en el contexto de una economía





basada exclusivamente en el agua.

En Ecuador, la reutilización de aguas residuales tratadas, ART, se encuentra regulada en Ecuador mediante la Regulación DIR-ARCA RG 004-2016 (2016), que establece las condiciones y excepciones para el reúso de aguas residuales, definiendo parámetros de calidad, muestreo y autorización administrativa. Así mismo, la normativa nacional reconoce que el reúso sólo es permitido cuando las aguas tratadas cumplan con los parámetros que establece la autoridad hídrica, y excluye destinar el efluente a consumo humano directo (Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica, 2015).

Además, el Código Orgánico del Ambiente (2017), el Texto Único de las Normas Ambientales Secundarias (2017) y el Acuerdo Ministerial 097-A (2015) regulan el uso de aguas residuales tratadas, estipulando parámetros y condiciones de calidad que hacen que este uso sea seguro y sensato desde el punto de vista ambiental. La normativa local en Quito está supervisada por el Fondo para la Protección del Agua, FONAG, (2022), que prioriza la ecología en los proyectos que apoya. En conjunto, estas normas garantizan que el uso de agua tratada en emergencias, como la lucha contra incendios forestales, sea una acción segura y sostenible.

El uso de aguas residuales tratadas como recurso alternativo en actividades no potables, como el combate de incendios forestales, ofrece una solución ambientalmente sostenible frente a la escasez hídrica; sin embargo, implica una serie de riesgos físicos, químicos y biológicos que deben evaluarse y controlarse para garantizar la seguridad del personal expuesto (WaterReuse Los Angeles, 2021).

Desde la perspectiva biológica, las aguas residuales pueden contener una amplia variedad de microorganismos patógenos, bacterias, virus, hongos y





parásitos, que representan una amenaza para la salud humana. Entre los patógenos más frecuentes se encuentran *Escherichia coli*, *Salmonella spp.*, *Giardia lamblia* y *Enterovirus*, los cuales pueden causar infecciones gastrointestinales, dérmicas o respiratorias si se produce contacto directo, salpicaduras o inhalación de aerosoles contaminados (Partyka, 2022).

La Organización Mundial de la Salud (OMS, 2013) establece que, incluso después del tratamiento, las aguas regeneradas deben cumplir límites microbiológicos estrictos, por ejemplo, menos de 1 UFC/100 mL de *E. coli* y recomienda un monitoreo continuo del efluente para minimizar el riesgo infeccioso. En cuanto a los riesgos químicos, las aguas residuales pueden contener metales pesados como plomo, cadmio, mercurio, arsénico o cromo, así como contaminantes orgánicos persistentes, fármacos, detergentes y pesticidas (Yakamecan et al., (2025).

La seguridad y salud ocupacional en las brigadas de emergencia es un factor clave para proteger al personal encargado de la atención y el control de incendios, dado que, los bomberos se enfrentan a diversos riesgos derivados de la naturaleza de su trabajo, y muchos de ellos están relacionados con incendios incontrolados. Los brigadistas enfrentan una amplia gama de riesgos laborales derivados de la naturaleza extrema de sus funciones, entre los cuales destacan la exposición constante a altas temperaturas, humo, gases tóxicos, así como a agentes químicos y biológicos presentes en los materiales combustibles. Estas condiciones pueden afectar el sistema respiratorio, provocar quemaduras térmicas o químicas y generar estrés térmico y fatiga física, lo que incrementa la posibilidad de accidentes laborales (Guerra y Thostrup, 2025).

Las brigadas forestales (o equipos de respuesta a emergencias) son grupos designados y entrenados con antelación para gestionar, coordinar y actuar





es este tipo de eventos (Bearman et al., (2023). En cuanto a las condiciones de trabajo de las brigadas forestales, la investigación reciente subraya que la labor de combate de incendios implica exposición a humo, partículas finas (PM2.5), gases tóxicos, radiación térmica, esfuerzo físico intenso y estrés térmico, por lo que estos profesionales presentan mayor riesgo de enfermedad pulmonar y cardiovascular debido a la inhalación de humo de incendios activos (Navarro, 2020).

Así mismo, se ha establecido que las tareas diarias de brigadistas conllevan riesgo de quemaduras, golpes, caídas, y exposición prolongada a humo y calor, y que estos trabajadores muchas veces no utilizan equipos respiratorios completos debido a las condiciones del entorno (Navarro et al., (2024). Por su parte, Belval et al. (2025) documentan que los trabajadores forestales del fuego sufren lesiones graves asociadas a caídas, derrumbes o atrapamientos en los incendios, lo que refuerza la característica de alto riesgo del trabajo.

## **Estado del Arte**

En los últimos años, se han consolidado dos áreas complementarias: proyectos y directrices que demuestran la viabilidad operativa del uso de agua reciclada para mitigar/prevenir incendios en la interfaz urbano-forestal, y evidencia ocupacional sobre la exposición de los equipos de extinción de incendios a riesgos físicos, biológicos y químicos al trabajar con agua y humo, que debe integrarse en protocolos específicos para el uso de estas dos herramientas clave de extinción (Texeira et al., (2024).

La reutilización de aguas tratadas en actividades operativas ha cobrado relevancia en contextos de escasez hídrica, especialmente en zonas vulnerables a incendios forestales. Diversos estudios han abordado esta





práctica desde perspectivas técnicas, ambientales y normativas, pero pocos han explorado sus implicaciones directas en la seguridad y salud ocupacional de brigadas de emergencia (WaterReuse Los Angeles, 2021).

El proyecto GUARDIAN en España sirve como referencia aplicada: implementa un sistema de riego altamente sofisticado con una función preventiva y de asistencia para las operaciones de extinción de incendios en un área de aproximadamente 2.000 hectáreas y alrededor de 15.000 personas, en la interfaz con la urbanización. Sin embargo, no proporciona un protocolo de extinción de incendios para el público. Esto representa una necesidad de seguridad pública y una brecha que los departamentos de bomberos de EE.UU. pueden aprovechar y potencialmente subsanar (European Urban Initiative, 2023).

En América Latina, el INTA de Argentina ha desarrollado investigaciones sobre el uso de aguas residuales tratadas en cultivos forestales, evaluando riesgos ambientales y sanitarios. Cremona et al. (2018) destacan la importancia de monitorear la calidad del agua y sus efectos en el ecosistema, pero no abordan la exposición ocupacional de brigadistas ni los riesgos derivados del contacto directo con el recurso.

La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, FAO, (2023), a través de sus módulos técnicos, promueve el uso responsable de aguas tratadas en sistemas agroforestales. Sus recomendaciones incluyen medidas generales de protección personal y monitoreo sanitario, aunque el enfoque sigue siendo ambiental y productivo, sin una evaluación sistemática de los riesgos laborales asociados.





En Ecuador, los lineamientos del Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica, MAATE, permiten el uso de aguas residuales tratadas bajo ciertos criterios de calidad. Sin embargo, no existen estudios específicos sobre su aplicación en incendios forestales ni sobre los efectos en la salud ocupacional de brigadas. Este vacío representa una oportunidad para generar evidencia local que articule sostenibilidad hídrica, gestión de riesgos y protección del personal de primera respuesta (Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica, 2015).

Por otro lado, las brigadas de bomberos que utilizan agua tratada para combatir incendios forestales se enfrentan a una variedad de peligros: físicos, biológicos y químicos, por lo que, una estrategia integral de salud y seguridad ocupacional es imperativa para que los bomberos estén lo más seguros posible. La literatura reciente subraya este punto y exige un enfoque integrado que abarque el diseño del sistema de agua; la capacitación en seguridad de los bomberos; las señales de peligro de fuego, agua y aerosoles y las precauciones que deben tomarse en caso de un accidente (WaterReuse Los Angeles, 2021).

- Peligros físicos. La carga térmica es el riesgo dominante: la combinación de radiación, humedad ambiental, equipo de protección personal, EPP, y esfuerzo elevado durante el despliegue de mangueras o cañones incrementa la tensión térmica, el agotamiento por calor y los eventos cardiorrespiratorios (García-Heras et al., (2025).
- Peligros biológicos: En usos no potables con atomización (aspersores, cañones o chorros), la inhalación de bioaerosoles y la ingestión incidental son vías críticas de exposición. La evidencia





proveniente de plantas de tratamiento de aguas residuales y evaluaciones QMRA (Evaluación Cuantitativa del Riesgo Microbiano) señala la exposición potencial a bacterias, hongos, endotoxinas y virus, siendo mayor en procesos con aerosolización. La transferencia de controles al contexto de brigadas incluye la implementación de barreras múltiples (tratamiento y desinfección acordes al uso), monitoreo operativo, por ejemplo, turbidez, Transmitancia Ultravioleta (UVT), desinfectante residual, uso de boquillas de baja nebulización, distancia adecuada fuente-persona, y EPP respiratorio y ocular (Riesenberger et al., (2024).

- Peligros químicos: El humo, que contiene PM (Material Particulado), CO (Monóxido de Carbono), COV (Compuestos Orgánicos Volátiles) y PAHs (Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos), representa riesgos respiratorios y cardiovasculares que coexisten con el uso de agua regenerada (Wah et al., (2025).

El estado del arte revela que, en el contexto de uso de aguas tratadas para combate de incendios forestales, los riesgos de SST para brigadas pueden agruparse en tres bloques: físicos (calor, carga, resbalones), biológicos (aerosolización, contacto, ingestión) y químicos (humo, contaminantes emergentes). Mientras que cada uno de estos bloques está respaldado por literatura reciente, ninguno los aborda de forma integrada con el uso de agua regenerada en incendios forestales y la seguridad ocupacional de las brigadas.

Esto destaca una oportunidad de investigación estratégica, con el fin de desarrollar un enfoque sistemático de evaluación de riesgos y beneficios, que integre todos los elementos, proponga protocolos adaptados para





brigadas y aporte evidencia local que hoy día no existe. Estableciendo, sin embargo, que la reutilización del agua tratada se ha convertido en un nuevo método sostenible para afrontar la creciente escasez de agua y la intensificación de los incendios forestales.

## **Desarrollo.**

### **Contexto y fundamento del uso de aguas tratadas en incendios forestales**

El uso de las ART en el combate de incendios forestales constituye una alternativa estratégica y emergente frente a la crisis hídrica que afecta a diversas regiones del mundo, incluida América Latina. Este enfoque, respaldado por tendencias internacionales de gestión sostenible del recurso hídrico, aparece como una solución innovadora para reducir la presión sobre las fuentes de agua potable y garantizar la respuesta oportuna en escenarios de emergencia que requieren grandes volúmenes de agua.

En ciudades como Quito, donde confluyen fenómenos como la disminución de precipitaciones, el retroceso glaciar, el aumento de la demanda urbana y la intensificación de incendios forestales, la incorporación de agua tratada en operaciones de control de incendios es un tema que demanda análisis técnico, sanitario, ambiental y normativo. Para comprender su relevancia, es necesario contextualizar la problemática hídrica y el comportamiento de los incendios forestales en la región, así como los fundamentos técnicos y regulatorios que determinan la viabilidad del uso de ART en actividades operativas de emergencia.





## **Crisis hídrica y aumento de incendios forestales en Quito y América Latina.**

Estudios recientes indican que la región experimenta una reducción sostenida en la disponibilidad de agua debido a la disminución de precipitaciones, la degradación de ecosistemas reguladores como páramos y bosques, el aumento de las temperaturas y una creciente demanda hídrica que supera la capacidad de reposición natural de los sistemas (Insausty & Escobar, 2024). Esta situación se agrava debido al avance del cambio climático, que afecta de manera directa a los glaciares andinos, principales reservas de agua dulce para ciudades como Quito. La UNESCO (2024) advierte que los glaciares de menor altitud en los Andes tropicales podrían perder entre un 78 % y un 97 % de su volumen hacia finales de siglo, reduciendo aún más la disponibilidad de agua durante épocas secas.

En este contexto de estrés hídrico, los incendios forestales han aumentado tanto en frecuencia como en severidad en gran parte de América Latina. El informe de la Oficina de las Naciones Unidas para la Reducción del Riesgo de Desastres, UNDRR, (2023) evidencia que los incendios en la región están vinculados no solo a factores climáticos como olas de calor y sequías prolongadas, sino también a actividades humanas como quemas agrícolas, expansión de la frontera agrícola y deforestación. Ecuador no es ajeno a este fenómeno.

Hasta septiembre de 2024, se habían perdido más de 16.000 hectáreas de ecosistemas forestales debido a incendios (Acción Ecológica, 2024), una cifra alarmante para un país con una superficie relativamente pequeña y alta biodiversidad. A esto se suma que, según García (2024), los incendios





ocurridos en 2024 han provocado seis personas fallecidas, 46 heridos y más de 44.000 animales muertos, además de afectar a 251 personas y expandirse a 22 provincias del país.

La situación de Quito es particularmente compleja debido a su ubicación geográfica, su crecimiento urbano acelerado y la presión sobre sus fuentes de agua. La Empresa Pública Metropolitana de Agua Potable y Alcantarillado (EPMAPS, 2024) ha advertido que la ciudad atraviesa un período de sequía y que el uso de agua potable para actividades no prioritarias resulta insostenible. Esta afirmación refleja la urgencia de implementar alternativas que disminuyan la presión sobre el sistema de agua potable y de explorar mecanismos como el uso de aguas residuales tratadas en actividades que no requieren agua de calidad potable, como es el caso del combate de incendios forestales.

Si se considera que la lucha contra incendios forestales puede requerir cientos de miles de litros de agua por evento, la situación adquiere un carácter crítico; además, estos incendios suelen coincidir con épocas secas, cuando las fuentes de agua están más vulnerables. El efecto combinado de una mayor demanda hídrica para extinguir incendios y una reducción simultánea de la disponibilidad de agua potable sitúa a las ciudades en una posición de riesgo operativo, sanitario y ambiental. En consecuencia, explorar alternativas como el uso de ART se convierte en una necesidad tanto para la gestión de emergencias como para la sostenibilidad hídrica a largo plazo. En la tabla 1 se identifica y compara las principales fuentes potenciales de aguas residuales tratadas disponibles en Quito y sus alrededores:





**Tabla 1:** Comparación de fuentes potenciales de aguas residuales tratadas (ART) para uso en incendios forestales en Quito.

Fuente de ART	Ubicación	Volumen aproximado diario disponible	Tipo de tratamiento	Calidad estimada	Potencial de uso en incendios
<b>PTAR Quitumbe</b>	Sur de Quito	200–300 L/s	Primario + secundario	Apto para usos no potables con desinfección	Alto
<b>PTAR Carapungo</b>	Norte de Quito	100–150 L/s	Secundario avanzado	Apto para riego y usos operativos	Alto
<b>Planta de Tratamiento del Aeropuerto (AIQ – Tababela)</b>	Parroquia Tababela	15–20 L/s	Secundario con desinfección UV	Apta para usos no potables operativos	<b>Muy alto</b> por cercanía a zonas sensibles
<b>Aguas tratadas de industrias (Quito)</b>	Diversos polos industriales	Variable	Secundario	Calidad irregular	Medio
<b>PTAR Tumbaco–Cumbayá</b>	Valles orientales	40–60 L/s	Secundario	Apto con desinfección	Alto

El Aeropuerto Internacional Mariscal Sucre, administrado por Corporación Quiport, ha incorporado un sistema de gestión ambiental que incluye infraestructuras especializadas para el tratamiento y reutilización del agua. Entre estos componentes se encuentra el estanque de tratamiento, diseñado para gestionar volúmenes importantes de aguas residuales generadas en las operaciones aeroportuarias.



**Figura 1.** Planta de tratamiento de aguas residuales de Quipor



**Fuente:** (El Comercio, 2023)

## **Justificación técnica del uso de aguas residuales tratadas (ART)**

Desde el punto de vista técnico, el uso de ART en el combate de incendios forestales es considerado viable siempre que el agua tratada cumpla con criterios mínimos de calidad establecidos en normas internacionales y nacionales para usos no potables. Esta práctica, además de reducir la demanda de agua potable, permite aprovechar un recurso abundante y renovado constantemente a través de los sistemas de alcantarillado y tratamiento de aguas residuales (Silva, 2023).

El proceso de tratamiento de aguas residuales incluye varias etapas que pueden ir desde la remoción de sólidos gruesos, sedimentación, filtración, procesos biológicos, desinfección por cloro o radiación ultravioleta y, en casos más avanzados, ultrafiltración o tratamiento terciario (Silva, 2023). Según Florides et al. (2024), la calidad final del agua dependerá del grado



de tratamiento aplicado y del propósito final del reúso. Para usos no potables que impliquen dispersión o contacto indirecto, como es el caso del uso en incendios forestales, se recomienda un tratamiento secundario avanzado con desinfección, capaz de reducir la carga microbiológica a niveles seguros.

La normativa de la OMS establece que para usos no potables con posible exposición humana, el agua tratada debe contener menos de 1 UFC/100 mL de *Escherichia coli* (OMS, 2013). Otros organismos como la EPA (2023) recomiendan parámetros adicionales, como la reducción de turbidez, la ausencia de sólidos flotantes y la presencia de desinfectante residual para minimizar riesgos biológicos. En América Latina, investigaciones como la de Kesari et al. (2021) han demostrado que el agua residual tratada puede cumplir estas características siempre que exista un esquema adecuado de monitoreo, trazabilidad y control operativo.

Desde un punto de vista técnico-operativo, el agua tratada presenta varias ventajas para el combate de incendios forestales. Primero, su disponibilidad suele ser constante, dado que se produce diariamente en las plantas de tratamiento. Segundo, no compite con el uso humano directo, por lo que su utilización en emergencias evita comprometer la reserva de agua potable. Tercero, contribuye a mantener la infraestructura hídrica en funcionamiento y a fortalecer la resiliencia urbana en situaciones de estrés hídrico (Kesari et al., 2021).

Sin embargo, no todos los sistemas están preparados para la distribución de ART hacia brigadas, destacando que, proyectos emblemáticos como el GUARDIAN en España han demostrado que el diseño de redes específicas para agua regenerada puede ser altamente eficaz para la prevención y





control de incendios en la interfaz urbano-forestal (European Urban Initiative, 2023). Estos modelos indican que la infraestructura debe incluir tanques de almacenamiento, estaciones de bombeo, redes separativas y sistemas de control que garanticen la calidad del agua en todo momento.

## **Normativa vigente y vacíos regulatorios en el uso de ART para emergencias**

La OMS (2013) ha establecido directrices claras para el uso seguro de aguas residuales tratadas en diversos contextos, basadas en el enfoque de Gestión del Riesgo Sanitario y en modelos de Evaluación Cuantitativa del Riesgo Microbiano. Por su parte, la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA, 2023) ha publicado guías detalladas para el reúso de agua, enfatizando parámetros microbiológicos, monitoreo de la calidad y buenas prácticas operativas para minimizar la exposición humana.

A nivel normativo, uno de los instrumentos más relevantes es el Reglamento Europeo 2020/741, que establece requisitos mínimos para la reutilización del agua en la Unión Europea (Parlamento Europeo, 2020). Asimismo, la norma ISO 16075 proporciona lineamientos técnicos para el uso de aguas tratadas en riego, los cuales son aplicables a otros usos no potables que implican contacto indirecto, como el combate de incendios (ISO, 2020).

En Ecuador, el marco legal para la reutilización de aguas tratadas está determinado por varios instrumentos, entre los que se menciona la Regulación DIR-ARCA-RG-004- 2016 establece las condiciones para el reúso de ART, incluyendo parámetros de calidad, protocolos de muestreo y requisitos administrativos para su autorización (ARCA, 2016). El





Código Orgánico del Ambiente (2017) y el TULSMA (Ministerio del Ambiente, 2017) complementan este marco al establecer normas para la calidad ambiental y los límites permisibles de descarga y reúso del agua. Sin embargo, ninguno de estos instrumentos menciona explícitamente el uso de ART en contextos de emergencia o en actividades de control de incendios forestales.

Este vacío regulatorio constituye uno de los principales desafíos para su implementación, destacando que, si bien la normativa ecuatoriana permite el reúso de aguas tratadas para fines agrícolas, industriales o recreativos, aún no existe un protocolo nacional que establezca estándares de calidad, medidas de seguridad ocupacional, procedimientos operativos y responsabilidades institucionales para el uso de ART en brigadas de emergencia. Esto contrasta con países como Estados Unidos, donde asociaciones como WaterReuse Los Angeles (2021) han elaborado protocolos especializados para el uso de agua regenerada en entrenamiento y supresión de incendios.

El caso de Quito ejemplifica esta situación, dado que, aunque EPMAPS cuenta con infraestructura de tratamiento avanzada, no se ha formalizado un sistema de distribución de ART para actividades de emergencias. La ausencia de un marco normativo específico genera incertidumbre para las brigadas y expone al personal a posibles riesgos biológicos o químicos al manejar agua cuya calidad puede fluctuar si no existe un monitoreo continuo.

Por lo tanto, la creación de un protocolo nacional o municipal para el uso de ART en el combate de incendios forestales no solo es recomendable, sino necesaria para garantizar seguridad, eficiencia operativa y





sostenibilidad hídrica. Dicho protocolo debería integrar elementos técnicos, sanitarios, ocupacionales, ambientales y de responsabilidad institucional basados en normas internacionales y evidencia científica reciente.

## **Riesgos ocupacionales derivados del uso de aguas tratadas en brigadas de emergencia.**

El uso de aguas residuales tratadas, ART, en el combate de incendios forestales representa una alternativa sostenible y estratégica frente a la escasez de agua potable, pero también plantea riesgos ocupacionales que deben ser identificados y gestionados cuidadosamente para proteger la salud y seguridad de los brigadistas. Los incendios forestales constituyen uno de los escenarios laborales más complejos y peligrosos debido al comportamiento impredecible del fuego, las condiciones extremas del ambiente y las elevadas exigencias físicas a las que se enfrentan los equipos de emergencia. Al incorporar ART en las operaciones, los riesgos no desaparecen, sino que se transforman y, en algunos casos, pueden incrementarse o combinarse con los peligros tradicionales del combate de incendios.

Diversos estudios científicos sobre la salud ocupacional de los bomberos revelan que la exposición simultánea a calor, humo, sustancias tóxicas y cargas físicas intensas constituye un factor determinante en la aparición de enfermedades respiratorias, dermatológicas, cardiovasculares y trastornos musculoesqueléticos (Cuenca & Ramírez, 2023; Guerra & Thostrup, 2025).

Por su parte, investigaciones recientes sobre la composición microbiológica y química del agua residual tratada muestran que, si bien el





tratamiento reduce significativamente los contaminantes, persisten microorganismos y sustancias químicas que podrían representar riesgos para la salud si no se aplican controles adecuados (Kesari et al., 2021; OMS, 2013). En consecuencia, es fundamental analizar los riesgos físicos, biológicos y químicos que emergen del uso combinado de ART y de las condiciones extremas propias de los incendios forestales.

### **Riesgos físicos asociados al combate de incendios con ART**

Los riesgos físicos son los más evidentes y frecuentes en el combate de incendios forestales, sin embargo, el uso de agua tratada no modifica el perfil general de peligros físicos inherentes al trabajo de los brigadistas; sin embargo, ciertas características del agua residual, como su viscosidad, temperatura o presencia de sedimentos finos, pueden potenciar algunos riesgos. Entre los principales riesgos destacan el estrés térmico, quemaduras, caídas y resbalones, lesiones por manipulación de mangueras y limitaciones de visibilidad y movilidad.

García-Heras et al. (2025) señalan que la carga térmica combinada, radiación del fuego, esfuerzo físico y uso de equipo de protección personal (EPP), incrementa la probabilidad de agotamiento por calor, síncope, calambres y deshidratación severa. Cuando se emplea ART, especialmente si su temperatura es más alta que la del agua potable (debido a procesos de tratamiento o almacenamiento), el impacto sobre la temperatura corporal del brigadista puede ser mayor.

Las quemaduras son otro riesgo significativo, aunque el agua, sea potable o tratada, es utilizada para extinguir el fuego, las mangueras, boquillas y herramientas metálicas pueden calentarse a temperaturas elevadas.





Además, el vapor generado por el choque del agua con superficies en combustión puede causar quemaduras térmicas o escaldaduras, esta situación puede agravarse si el agua tratada contiene sedimentos o turbidez, ya que puede disminuir la eficiencia de pulverización y generar chorros menos controlados (García-Heras et al., 2025).

Los resbalones y caídas representan un riesgo adicional, dado que el combate de incendios implica trabajar en terrenos irregulares, con pendientes, ceniza, ramas y materiales en combustión, por lo que, el uso de ART con presencia mínima de sólidos en suspensión o grasas residuales, aunque estén dentro de parámetros normativos, podría aumentar la viscosidad del agua y generar superficies más resbaladizas. En este sentido, Navarro (2020) advierte que las caídas durante operaciones de emergencia se encuentran entre las principales causas de lesiones musculoesqueléticas en brigadas forestales.

Asimismo, existe riesgo por la presión de las mangueras, especialmente cuando se trabaja con bombas de alta capacidad. La estabilidad del chorro puede verse afectada si el agua contiene microburbujas o variaciones en turbidez, lo que altera el peso del agua y la resistencia hidráulica de las mangueras, destacando que los impactos repentinos por pérdida de control de mangueras de alta presión son responsables de lesiones graves, incluyendo golpes, fracturas y traumas por impacto (Belval et al., 2025).

Finalmente, las condiciones extremas del entorno, como humo denso, viento fuerte, caída de ramas y propagación rápida del fuego, aumentan la probabilidad de accidentes. Cuando se utiliza ART, especialmente en condiciones de baja visibilidad, la combinación de vapor, aerosoles y humos





puede dificultar aún más la movilidad y percepción espacial de los brigadistas.

## **Riesgos biológicos por exposición a microorganismos en ART**

Los riesgos biológicos representan uno de los aspectos más sensibles del uso de ART en el combate de incendios forestales, dado que, aunque el agua haya sido tratada, puede contener microorganismos patógenos residuales que, al aerosolizarse durante el proceso de extinción, pueden ser inhalados o entrar en contacto con la piel, mucosas o heridas abiertas. La evaluación microbiana del agua tratada demuestra que, aun con tratamientos avanzados, pueden persistir bacterias, virus, hongos y parásitos que representan un riesgo para la salud humana (OMS, 2013; Partyka, 2022).

Entre los microorganismos potencialmente presentes en ART se encuentran *Escherichia coli*, *Salmonella* spp., *Giardia lamblia*, *Cryptosporidium*, enterovirus y diversos hongos ambientales. La OMS (2013) establece que los límites mínimos aceptables para usos no potables con exposición humana indirecta deben ser estrictos, incluyendo menos de 1 UFC/100 mL de *E. coli*. Sin embargo, investigaciones como las de Riesenberger et al. (2024) muestran que incluso valores dentro de norma pueden representar riesgos cuando existen procesos de aerosolización intensa.

Durante el combate de incendios, los brigadistas están expuestos a bioaerosoles, que se generan cuando el agua impacta superficies calientes, vegetación seca, ceniza o estructuras en combustión. En presencia de ART, estos aerosoles pueden transportar microorganismos respirables que se inhalan con facilidad. Este proceso es similar al observado en plantas de





tratamiento de aguas residuales, donde los trabajadores muestran alta prevalencia de infecciones respiratorias, irritación ocular y síntomas gastrointestinales asociados a bioaerosoles contaminados (Riesenberger et al., 2024).

El contacto dérmico constituye otro mecanismo relevante de exposición, dado que pequeñas abrasiones, heridas o irritaciones cutáneas abiertas facilitan la entrada de patógenos presentes en el agua. Además, los brigadistas suelen trabajar en condiciones que favorecen la sudoración y debilitan la barrera protectora de la piel, aumentando la vulnerabilidad, lo que deriva en que varios microorganismos presentes en agua tratada pueden causar dermatitis, infecciones dérmicas, conjuntivitis o inflamación en mucosas (Kesari et al., 2021).

La inhalación de aerosoles contaminados, en combinación con el humo del incendio, genera un riesgo dual. El sistema respiratorio ya está comprometido por la exposición a partículas finas (PM2.5), monóxido de carbono (CO) y compuestos orgánicos volátiles del humo (Wah et al., 2025). Si se agrega la presencia de microorganismos o endotoxinas provenientes del agua, se incrementa el riesgo de bronquitis, neumonitis, infecciones respiratorias e incluso efectos sistémicos asociados a endotoxinas bacterianas.

Finalmente, los patógenos persistentes, como *Giardia* y *Cryptosporidium*, pueden sobrevivir en ART incluso después de la cloración, especialmente cuando la turbidez del agua es elevada o cuando existen fallas operativas en la desinfección. Estas especies son altamente resistentes y pueden ocasionar brotes gastrointestinales entre brigadistas si se produce





ingestión accidental, una situación plausible en entornos donde se manipulan mangueras bajo estrés y en condiciones de visibilidad limitada.

## **Riesgos químicos por contaminantes emergentes y su interacción con humo**

Los riesgos químicos asociados al uso de ART en incendios forestales son particularmente relevantes debido a la presencia de contaminantes emergentes en el agua tratada, combinada con la inhalación de humo y partículas resultantes de la combustión de vegetación y materiales. La evidencia científica confirma que el agua residual tratada puede contener trazas de metales pesados, fármacos, productos de cuidado personal, pesticidas, compuestos orgánicos volátiles (COV) y contaminantes orgánicos persistentes (Yakamecan et al., 2025; Kesari et al., 2021).

Uno de los principales riesgos químicos proviene de metales pesados como plomo, cadmio, mercurio y arsénico. Aunque sus concentraciones suelen ser bajas tras el tratamiento, la exposición prolongada o repetida puede generar acumulación en el organismo, especialmente por contacto dérmico o ingestión incidental. Estos metales tienen efectos neurotóxicos, renales y hematológicos probados (Kesari et al., 2021). Los compuestos orgánicos volátiles (COV) presentes en ART pueden volatilizarse fácilmente cuando el agua se aplica sobre superficies calientes. Su inhalación, combinada con el humo del incendio, puede causar irritación respiratoria, mareos, cefaleas y efectos a largo plazo sobre el sistema nervioso (Teixeira et al., 2024).

La exposición a material particulado fino (PM2.5 y PM10) constituye otra amenaza significativa., lo cual se ha demostrado en el estudio de Wah et al.





(2025) en el cual se determin6 que los bomberos forestales presentan deterioro pulmonar a causa de la inhalaci6n cr6nica de part6culas del humo. Si a esto se suma la aerosolizaci6n de residuos org6nicos o qu6micos provenientes del agua tratada, la carga t6xica respiratoria aumenta sustancialmente.

Otro grupo importante de contaminantes incluye f6rmacos residuales y productos de cuidado personal, identificados ampliamente en ART, aunque sus efectos a corto plazo en brigadistas son menos estudiados, existe evidencia de que pueden generar irritaci6n cut6nea, alergias o disrupciones endocrinas (Yakamecan et al., 2025).

Finalmente, la interacci6n qu6mica entre los contaminantes del agua y los compuestos del humo puede generar reacciones impredecibles. Por lo que, la combinaci6n de hidrocarburos arom6ticos polic6clicos (PAHs), materiales en combusti6n y sustancias presentes en el ART puede formar compuestos secundarios potencialmente t6xicos a6n no completamente estudiados (Teixeira et al., 2024). En la tabla 2 se presentan los riesgos ocupacionales espec6ficos derivados del uso de ART en incendios:

**Tabla 2:** Riesgos ocupacionales espec6ficos derivados del uso de ART en incendios.

Categoría de riesgo	Descripci6n	Ejemplos asociados al uso de ART
Físicos	Condiciones ambientales hostiles	Resbalones por pel6culas viscosas, quemaduras por vapor, reducci6n de visibilidad
Biol6gicos	Exposici6n a microorganismos residuales	E. coli, Giardia, Cryptosporidium aerosolizados
Qu6micos	Exposici6n a contaminantes emergentes	Metales, f6rmacos, PFAS, pesticidas
Ergon6micos	Posturas y fuerza f6sica excesiva	Control de mangueras con agua de mayor viscosidad
Psicosociales	Estr6s, fatiga por emergencias prolongadas	Uso continuo de ART bajo incertidumbre operacional

**Fuente:** Elaboraci6n propia con base en OMS (2013), Kesari et al. (2021), Yakamecan et al. (2025), Riesenberger et al. (2024) y literatura especializada sobre riesgos ocupacionales en brigadas de incendio.





## **Aportes del uso de aguas tratadas a la sostenibilidad operativa y sanitaria de las Brigadas.**

El uso de aguas residuales tratadas (ART) en las operaciones de las brigadas de emergencia frente a incendios forestales representa una estrategia sumamente prometedora no sólo desde la perspectiva del combate del fuego, sino también desde la de la sostenibilidad operativa, la reducción del consumo de agua potable y la salud del personal. Cuando se implementa de forma segura y eficiente, el reúso de ART puede convertirse en un elemento estructural para la resiliencia hídrica y operativa de la respuesta emergente, aliviando la presión sobre fuentes convencionales de agua, garantizando continuidad de abastecimiento en situaciones críticas y contribuyendo al marco de sostenibilidad de la organización y la comunidad. A continuación, se analizan tres ejes fundamentales: la optimización del recurso hídrico, los beneficios en emergencias prolongadas, y las condiciones necesarias para hacer este uso seguro y sostenible.

### **Optimización del recurso hídrico y reducción de presión sobre el agua potable**

La optimización del recurso hídrico mediante el uso de ART en el combate de incendios forestales tiene múltiples implicaciones positivas para la sostenibilidad de los sistemas urbanos y operativos de respuesta. En primer lugar, las fuentes de agua potable tradicional suelen estar en estrés especialmente durante épocas de sequía, cuando el nivel de embalses disminuye y la demanda residencial y municipal continúa. En tal contexto, la reutilización de agua tratada permite liberar agua de potabilización para





usos que efectivamente lo requieren, mientras se emplea un recurso alternativo para tareas de alta demanda hídrica como la supresión de incendios.

La Environmental Protection Agency (2023) señala que la reutilización centralizada de agua no potable incluyendo el uso para protección contra incendios “puede conservar fuentes tradicionales de agua fresca, reducir la demanda de nuevas fuentes de agua, y disminuir el volumen de agua potable usada por una comunidad”. Esta reducción en el consumo de agua potable trae consigo beneficios directos tanto para la infraestructura como para los costes operativos del sistema hídrico.

Silva et al. (2023) verificaron que el reúso de aguas residuales mejora el suministro sin contaminación, reduce la presión sobre los recursos que la naturaleza tiene y ayuda a que las ciudades puedan seguir funcionando. En este sentido, existen estudios que indican que el tratamiento de aguas residuales y el reúso de las mismas para usos que no son para beber aportan a la gestión del recurso de agua. Además, el reúso aumenta la oferta de más agua y baja la presión sobre los ecosistemas donde nace el agua. Desde el punto de vista operativo de las brigadas de emergencia, disponer de una fuente alternativa de agua significa que durante episodios críticos no habría competencia entre el abastecimiento humano esencial y la necesidad de agua para extinción de incendios. Este aspecto refuerza la continuidad operativa, lo cual redundará en mayor eficiencia de respuesta.

Según la European Urban Initiative (2023), el proyecto GUARDIAN en Europa demostró que redes de agua regenerada pueden actuar como sistemas de respaldo hídrico para incendios urbanos-forestales, reduciendo la dependencia de agua potable. Otro factor relevante es la





reducción de la huella hídrica de la operación de emergencia, dado que, cada litro de agua potable utilizado en la extinción de incendios implica tratamiento, transporte, distribución y, frecuentemente, recirculación o gestión del lodo resultante. Al cambiar parte de este volumen por ART, el uso de energía disminuye, así como los residuos asociados lo cual se alinea con los principios de la economía circular. Yalin et al. (2023) establecen que el reúso de aguas residuales es una opción real en los lugares donde existe escasez. Actualmente, el mundo solo trata alrededor del ~50 % de la producción mundial de aguas residuales.

## **Beneficios para la sostenibilidad operativa en emergencias prolongadas**

Las emergencias prolongadas, tales como incendios forestales de gran escala que se extienden por días o semanas, demandan una infraestructura hídrica robusta, flexible e ininterrumpida. En ese sentido, el uso de ART puede proporcionar una mayor disponibilidad hídrica, contribuyendo a la resiliencia operativa de las brigadas, y permitiendo una cierta independencia de los sistemas de agua potable convencionales.

La resiliencia operativa se define como la capacidad de mantener la funcionalidad crítica, adaptarse a condiciones cambiantes y recuperarse rápidamente ante fallos del sistema. En escenarios de incendios forestales extremos, es común que sistemas de abastecimiento de agua potable sufran restricciones por caída de presión, roturas de tuberías, corte de suministro, o falta de volumen. En cambio, una red de ART puede estar diseñada de modo paralelo al sistema potable, reduciendo el riesgo de interrupción. La guía de la WaterReuse Los Angeles (2021) describe





protocolos específicos en los que “el agua reciclada se usa para combate de incendios y entrenamiento, proporcionando respaldo al sistema potable” (WaterReuse Los Angeles, 2021, p. 4).

La mayor disponibilidad hídrica también se relaciona con la capacidad de responder en múltiples frentes simultáneos sin comprometer el sistema potable. Tal como indica la EPA (2025), el uso de agua reciclada para usos no potables puede hacer que un sistema sea más resistente a la sequía, a incrementos en la demanda y a interrupciones del suministro. Esta característica es crítica para las brigadas que operan en comunidades urbanas-forestales, donde una falla en el suministro puede significar una catástrofe mayor.

La independencia funcional respecto al sistema de agua potable también aporta beneficios económicos y logísticos. Cuando se planifica la infraestructura de ART para respuesta a incendios, se pueden instalar tanques de almacenamiento dedicados, tuberías separadas y bombas independientes, lo que disminuye la competencia por los recursos potables y mitiga riesgos múltiples.

Estudios de ciclo de vida demuestran que el reúso de aguas residuales reduce costos totales en comparación con la ampliación de redes de agua potable, especialmente bajo escenarios de sequía o demanda creciente (Silva et al., 2023). Finalmente, estos beneficios estructuran un modelo operativo más sostenible, en el que las brigadas cuentan con una fuente específica, rentable y resiliente, alineada con principios de gestión de emergencia, continuidad operativa y adaptación climática.





## **Condiciones necesarias para un uso seguro y sostenible en brigadas**

El éxito del uso de ART en las brigadas de emergencia no depende únicamente de su disponibilidad, sino del cumplimiento de condiciones técnicas, operativas, sanitarias y de seguridad para garantizar que su uso sea seguro, eficiente y sostenible en el tiempo. Entre las condiciones críticas se encuentran: existencia de protocolos específicos, capacitación del personal, uso adecuado de EPP, y sistemas de monitoreo microbiológico y químico.

En el contexto de Quito o de brigadas forestales latinoamericanas, la ausencia de un protocolo específico es una brecha que debe cerrarse antes de la implementación operativa, además, la capacitación del personal de brigadas en la manipulación de ART, identificación de riesgos específicos, higiene operativa y protocolos de emergencia es otro pilar clave. Estudios en reúso de agua señalan que la aceptación social y operativa del ART depende en gran medida de la formación y comunicación con los usuarios (Karkou et al., (2024). En el ámbito de brigadas forestales, esto implica entrenamiento adicional en riesgos microbiológicos, químicos y físicos asociados al uso de agua regenerada.

El uso de Equipos de Protección Personal (EPP) adaptados a las condiciones del agua tratada y la operación de incendio es también indispensable. Esto incluye protección ampliada para contacto dérmico, inhalación de aerosoles, vapor caliente y presión hidráulica elevada. Además, los brigadistas deben contar con protocolos de higiene al finalizar la operación para minimizar la exposición residual.





El monitoreo microbiológico y químico garantiza que la calidad del ART sea adecuada para su uso. Según Abbaszadegan et al. (2025) existe creciente preocupación por microorganismos virales y compuestos emergentes como los PFAS en prácticas de reúso del agua, por lo que es imprescindible establecer barreras múltiples de seguridad. Estos sistemas de monitoreo deben formar parte de la cadena de custodia del agua, desde la planta de tratamiento hasta su aplicación en campo.

Este marco debe incluir, en primer lugar, el diseño adecuado de la infraestructura de abastecimiento. La red destinada al transporte de ART debe estar claramente diferenciada de los sistemas de agua potable, con señalización, válvulas de control, protocolos de desinfección, puntos de monitoreo y mecanismos para garantizar la trazabilidad de su calidad. Además, los tanques de almacenamiento, bombas y conexiones móviles deben ser diseñados con materiales resistentes a la corrosión y compatibles con el tipo de agua, considerando que el agua residual tratada puede contener trazas de químicos u otros compuestos capaces de deteriorar equipos convencionales. Una infraestructura adecuada no sólo garantiza la seguridad, sino que aumenta la eficiencia operativa de las brigadas en terreno.

Asimismo, los brigadistas deben comprender la naturaleza del agua residual tratada, sus riesgos asociados, sus ventajas operativas y los procedimientos específicos para su manipulación segura. La capacitación debe incluir el conocimiento de los riesgos microbiológicos, químicos y físicos; prácticas de higiene durante y después de la intervención; uso de equipos de protección especializados; y reconocimiento temprano de síntomas de exposición. La formación constante permite que el personal





adopte una postura preventiva y reduzca la probabilidad de accidentes o afecciones de salud a largo plazo.

El uso adecuado de EPP complementa este proceso. Los brigadistas deben contar con vestimenta, guantes, protección respiratoria y ocular que aseguren la mínima exposición posible al agua tratada y a los aerosoles generados durante la operación. Los cuales, deben ser resistente al calor, al agua presurizada y a posibles partículas o contaminantes residuales. Además, se requiere un protocolo de descontaminación al finalizar la operación para reducir riesgos derivados de la exposición prolongada a agentes químicos o biológicos presentes en el ART.

Finalmente, el monitoreo constante de la calidad del agua es un requisito esencial para garantizar la seguridad del proceso, lo cual implica evaluar la presencia de microorganismos patógenos, rastrear contaminantes emergentes, verificar los niveles de desinfección y asegurar que el agua cumpla con los estándares establecidos para su uso en actividades de extinción. Así mismo, el monitoreo no debe ser esporádico, sino que debe integrarse en una rutina institucional que acompañe todo el ciclo operativo del ART.

Solo a través de este conjunto articulado de acciones es posible traducir los beneficios de disponibilidad hídrica, sostenibilidad operativa y protección de la salud de los brigadistas en resultados efectivos, seguros y sostenibles a lo largo del tiempo. Esta visión integral permitirá que el uso de ART no sea únicamente una respuesta a la escasez de agua, sino un pilar estratégico en la gestión moderna de incendios forestales.





## Discusión

La reutilización de aguas residuales tratadas, ART, en el combate de incendios forestales representa un punto de convergencia entre la gestión sostenible del recurso hídrico, la salud ocupacional y la adaptación frente al cambio climático. A partir de los resultados presentados, se evidencia que su aplicación es técnicamente viable y ambientalmente pertinente; no obstante, implica riesgos ocupacionales que requieren ser gestionados mediante protocolos específicos, infraestructura adecuada y capacitación continua. La discusión que se presenta a continuación integra los hallazgos del marco teórico, el estado del arte y el desarrollo conceptual, articulando la evidencia internacional con las necesidades operativas y normativas del contexto ecuatoriano.

En primer lugar, la viabilidad técnica del uso de ART se fundamenta en avances significativos en el tratamiento de aguas residuales y en marcos regulatorios sólidos a nivel internacional, estableciendo que, organismos como la OMS (2013) y la EPA (2023) han fomentado lineamientos claros sobre los niveles microbiológicos y químicos permisibles para usos no potables con exposición indirecta humana. La literatura consultada coincide en que los tratamientos secundarios avanzados con desinfección logran niveles adecuados de reducción de microorganismos patógenos y contaminantes emergentes, haciéndolos aptos para actividades como riego, limpieza urbana y, potencialmente, extinción de incendios (Florides et al., 2024; Fernandes & Marques, 2023; Mannina et al., 2022).

Sin embargo, el uso de ART en incendios forestales presenta particularidades que exceden lo contemplado por las normas de reúso tradicionales, dado que, a diferencia de actividades agrícolas o industriales,





la extinción de incendios requiere la aplicación de grandes volúmenes de agua bajo presión, en ambientes extremos donde el calor, el humo, la ceniza y la topografía aumentan la probabilidad de accidentes. Esto implica que la evaluación de riesgos debe integrar no solo la calidad del agua, sino también las interacciones entre el agua tratada, el fuego y las condiciones físicas del entorno.

En este sentido, los hallazgos de Teixeira et al. (2024) y García-Heras et al. (2025) resultan relevantes, pues indican que los bomberos ya enfrentan riesgos significativos vinculados a la exposición al humo, partículas finas (PM2.5), monóxido de carbono, calor extremo y esfuerzos físicos intensos; el uso de ART añade nuevas variables que deben ser abordadas con criterios de bioseguridad.

En cuanto a los riesgos físicos, los resultados destacan que la carga térmica, las quemaduras, los resbalones y la manipulación de mangueras continúan siendo las principales amenazas ocupacionales (Navarro, 2020; Belval et al., 2025). Estos riesgos pueden intensificarse si el agua tratada presenta una temperatura superior a la del agua potable o una viscosidad ligeramente mayor debido a la presencia de sólidos finos permitidos por la normativa, lo cual podría afectar el control de mangueras y aumentar las posibilidades de caídas en el terreno. De forma similar, la formación de vapor al contacto del agua con superficies en combustión puede causar quemaduras por escaldadura, lo cual coincide con lo planteado por Guerra y Thostrup (2025) sobre lesiones térmicas en bomberos.

La exposición biológica es otro componente crítico abordado en los resultados. Si bien el tratamiento reduce la carga microbiana, estudios como los de Partyka (2022) y Riesenberger et al. (2024) confirman que la





aerosolización de ART puede dispersar microorganismos residuales, especialmente en actividades de alta presión. Durante la extinción de incendios, esta aerosolización es inevitable, y cuando se combina con el humo, se configura un riesgo dual que afecta principalmente el sistema respiratorio.

La literatura sobre plantas de tratamiento demuestra que los trabajadores expuestos a bioaerosoles presentan mayor incidencia de irritación ocular, infecciones respiratorias y síntomas gastrointestinales (Kesari et al., 2021), lo que permite inferir efectos similares en brigadistas si no se adoptan barreras de protección adecuadas.

Los riesgos químicos constituyen un tercer eje relevante, dado que, el agua tratada puede contener trazas de metales pesados, compuestos orgánicos volátiles, fármacos y contaminantes emergentes que, aunque presentes en concentraciones bajas, pueden volatizarse o reaccionar químicamente en condiciones de incendio (Yakamecan et al., 2025). Wah et al. (2025) establecen que los bomberos presentan deterioro pulmonar por la inhalación de humo; la presencia de químicos en el agua aplicada podría aumentar la carga tóxica y potenciar efectos respiratorios, dermatológicos y sistémicos, este punto evidencia la importancia de incorporar análisis de contaminantes emergentes en los protocolos de uso de ART para brigadas.

A pesar de estos riesgos, los beneficios operativos y ambientales del uso de ART generan argumentos sólidos para su implementación, por lo que, se puede establecer que, la reducción de la presión sobre el agua potable en un contexto de crisis hídrica es un aspecto fundamental. Destacando que, la región andina, y particularmente Quito, enfrenta un estrés hídrico





creciente por retroceso glaciario, disminución de lluvias y aumento de la demanda urbana (UNESCO, 2024; Insausty & Escobar, 2024).

Los incendios forestales coinciden con épocas secas, lo que intensifica la competencia entre el consumo humano y las emergencias y la literatura sobre resiliencia hídrica (EPA, 2025; European Urban Initiative, 2023) confirma que disponer de redes paralelas de ART permite asegurar suministro constante durante incendios prolongados, reduciendo la vulnerabilidad de los sistemas potables.

Además, como señalan Silva (2023) y Torretta et al. (2020), el uso de ART permite cerrar ciclos en la gestión del agua, disminuyendo la huella hídrica, la energía requerida en potabilización y los costos operativos de los sistemas públicos. La discusión también evidencia que el mayor obstáculo para la implementación en Ecuador no es técnico, sino normativo e institucional, aunque existen regulaciones para el reúso agrícola e industrial (ARCA, 2016; Ministerio del Ambiente, 2017), ninguna contempla explícitamente su uso en emergencias.

## **Conclusiones**

El presente estudio permite concluir que la reutilización de aguas residuales tratadas, ART, en el combate de incendios forestales en Quito constituye una alternativa técnicamente viable y ambientalmente pertinente frente al escenario de creciente crisis hídrica y aumento de eventos extremos asociados al cambio climático. La evidencia científica revisada demuestra que los sistemas de tratamiento secundario avanzado con desinfección pueden alcanzar parámetros de calidad adecuados para usos no potables con exposición humana indirecta, siempre que se





implementen controles continuos y protocolos específicos de gestión del riesgo sanitario.

No obstante, el análisis integral de los riesgos ocupacionales evidencia que el uso de ART introduce peligros adicionales para las brigadas de emergencia, particularmente de naturaleza biológica y química, los cuales se superponen a los riesgos físicos ya inherentes al combate de incendios forestales. La aerosolización del agua tratada durante la extinción, combinada con la inhalación de humo y partículas finas, representa una vía crítica de exposición que puede afectar el sistema respiratorio, la piel y las mucosas de los brigadistas si no se aplican barreras de protección adecuadas.

Asimismo, se concluye que el mayor desafío para la implementación de esta alternativa en el contexto ecuatoriano no es de carácter técnico, sino normativo e institucional. A pesar de que la legislación nacional contempla el reúso de aguas tratadas para fines agrícolas e industriales, no existen lineamientos específicos que regulen su aplicación en situaciones de emergencia, lo cual genera incertidumbre operativa y potenciales riesgos para la salud ocupacional del personal. Este vacío normativo limita la adopción sistemática de ART como recurso estratégico en incendios forestales.

Desde una perspectiva de sostenibilidad operativa, el uso de ART ofrece beneficios al reducir la presión sobre el agua potable, garantizar continuidad hídrica en emergencias prolongadas y fortalecer la resiliencia de los sistemas urbanos frente a la sequía. En consecuencia, el estudio concluye que la reutilización de aguas tratadas puede constituirse





en un pilar estratégico para la gestión moderna de incendios forestales en Quito, siempre que su implementación esté acompañada de un marco regulatorio específico, protocolos de seguridad ocupacional, capacitación permanente y monitoreo riguroso de la calidad del agua.

## Recomendaciones

Se recomienda prioritariamente la formulación de un marco normativo específico que regule el uso de aguas residuales tratadas en el combate de incendios forestales, considerando las particularidades operativas, sanitarias y ambientales de este tipo de emergencias. Dicho marco debe establecer parámetros claros de calidad del agua, responsabilidades institucionales, mecanismos de autorización y lineamientos de control, con el fin de garantizar una aplicación segura y uniforme en el territorio.

Asimismo, resulta indispensable el diseño e implementación de protocolos operativos y de seguridad ocupacional dirigidos a las brigadas de emergencia que utilicen aguas tratadas. Estos protocolos deben contemplar procedimientos estandarizados para la manipulación del recurso, medidas de prevención frente a riesgos físicos, biológicos y químicos, así como acciones de respuesta ante exposiciones accidentales. La estandarización de estos procesos permitirá reducir la variabilidad operativa y fortalecer la protección de la salud del personal.

Se recomienda también el fortalecimiento de los programas de capacitación continua para brigadistas, mandos operativos y personal técnico, enfocados en el manejo seguro del agua residual tratada, el uso adecuado de equipos de protección personal, la identificación temprana de síntomas asociados a posibles exposiciones y la aplicación de





medidas de higiene posterior a las operaciones. La formación permanente es clave para mejorar la percepción de seguridad y la eficiencia en el uso de este recurso alternativo.

De igual manera, es fundamental implementar sistemas de monitoreo continuo de la calidad del agua tratada, que incluyan controles microbiológicos y fisicoquímicos desde la planta de tratamiento hasta su uso en campo. Este monitoreo debe integrarse como una práctica rutinaria dentro de la gestión operativa, garantizando la trazabilidad y confiabilidad del recurso utilizado en emergencias.

Finalmente, se recomienda promover el desarrollo de investigaciones aplicadas y estudios piloto que evalúen la implementación real del uso de aguas tratadas en incendios forestales, con énfasis en la exposición ocupacional y los efectos en la salud del personal. Estos estudios permitirán generar evidencia local, ajustar los protocolos existentes y consolidar esta alternativa como una estrategia segura, sostenible y resiliente para la gestión de incendios forestales en contextos de escasez hídrica.

## Referencias

Abbaszadegan, M., Alum, A., Kitajima, M., Fujioka, T., & Katayama, H. (2025).

Water reuse—Retrospective study on sustainable future prospects.

*Water*, 17(6), 789. <https://doi.org/10.3390/w17060789>

Acción Ecológica. (2024). Incendios forestales en Ecuador. Acción

Ecológica. [https://www.accionecologica.org/incendios-forestales-](https://www.accionecologica.org/incendios-forestales-en-ecuador/)

[en-ecuador/](https://www.accionecologica.org/incendios-forestales-en-ecuador/)





Agencia de Regulación y Control del Agua (ARCA). (2016). Regulación No. DIR-ARCA-RG-004-2016. <https://regulacionagua.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2016/09/REGULACIÓN-DIR-ARCA-RG-004-2016.pdf>

Bearman, C., Hayes, P., & Thomason, M. (2023). Facilitating teamwork in emergency management: The team process checklist. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 94(103775). <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2023.103775>

Belval, E. J., Pietruszka, B. M., & Viktora, A. (2025). The price of doing business: Severe injuries in wildland firefighters in the United States by activity performed and hazard encountered. *International Journal of Wildland Fire*, 34. <https://doi.org/10.1071/WF25038>

Código Orgánico del Ambiente. (2017). Registro Oficial Suplemento 983 de 12 de abril de 2017. [https://www.ambiente.gob.ec/wpcontent/uploads/downloads/2018/01/CODIGO\\_ORGANICO\\_AMBIENTE.pdf](https://www.ambiente.gob.ec/wpcontent/uploads/downloads/2018/01/CODIGO_ORGANICO_AMBIENTE.pdf)

Cremona, M. V., Riat, M., Magnin, S., Velasco, V., Sanchez, V., & Tanzer, L. (2018). Reutilización de aguas residuales tratadas en cultivos forrajeros y forestales en Ing. Jacobacci. Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación Productiva de Argentina (MINCYT). [https://repositoriosdigitales.mincyt.gob.ar/vufind/Record/INTADi\\_g\\_ada209a0ec8d83e11f6188181540adcaf](https://repositoriosdigitales.mincyt.gob.ar/vufind/Record/INTADi_g_ada209a0ec8d83e11f6188181540adcaf)

Cuenca, M., & Ramírez, C. (2023). Occupational hazards in firefighting: Systematic literature review. *Safety and Health at Work*, 14(1), 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.shaw.2023.01.005>





D'Evelyn, S. M., Jihoun, J., Alvarado, E., Baumgartner, J., Caligiuri, P., Keala Hagmann, R., . . . Krawchuk, M. A. (2022). Wildfire, smoke exposure, human health, and environmental justice need to be integrated into forest restoration and management. *Current Environmental Health Reports*, 9(3), 366–385. <https://doi.org/10.1007/s40572-022-00355-7>

Dhall, A., Dhasade, A., Nalwade, A., Mohan, M. R., & Kulkarni, V. (2020). A survey on systematic approaches in managing forest fires. *Applied Geography*, 121(102266). <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2020.102266>

Dos Reis, M., Lima de Alencastro Graça, P. M., Yanai, A. M., Pacheco Ramos, C. J., & Fearnside, P. M. (2021). Forest fires and deforestation in the central Amazon: Effects of landscape and climate on spatial and temporal dynamics. *Journal of Environmental Management*, 288(112310). <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112310>

Environmental Protection Agency (EPA). (2023). *Guidelines for Water Reuse*. Washington, D.C. <https://www.epa.gov/waterreuse/guidelines-water-reuse>

EPMAPS. (2024). *Memoria de sostenibilidad 2024*. <https://aguaquito.gob.ec/Alojamientos/MEMORIA%20DE%20SOSTENIBILIDAD/MEMORIA%20DE%20SOSTENIBILIDAD%202024.pdf>

European Urban Initiative. (2023). *The GUARDIAN Project – Journal no4. Portico – Urban Initiative*. <https://portico.urban-initiative.eu/urban-stories/uia/guardian-project-journal-no4-5569>





Farid, A., Alam, M. K., Goli, V. S., Akinleye, T., Chen, X., Cheng, Q., . . . Koda, E. (2024). A review of the occurrence and causes for wildfires and their impacts on the geoenvironment. *Fire*, 7(8), 295. <https://doi.org/10.3390/fire7080295>

Fernandes, E., & Marques, R. (2023). Review of water reuse from a circular economy perspective. *Water*, 15(5), 848. <https://doi.org/10.3390/w15050848>

Florides, F., Giannakoudi, M., Ioannou, G., Lazaridou, D., Lamprinou, E., Loukoutos, N., . . . Katsoyiannis, I. A. (2024). Water reuse: A comprehensive review. *Environments*, 11(4). <https://doi.org/10.3390/environments11040081>

Fondo de Agua de Quito (FONAG). (2022). Informe anual de gestión hídrica y sostenibilidad. <https://www.fonag.org.ec/web/wp-content/uploads/2024/07/INFORME-DE-CUMPLIMIENTO-DE-METAS-FONAG-2022.pdf>

Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2023). Use of treated water in forestry and agroforestry. *FAO Sustainable Forest Management Toolbox*. <https://www.fao.org/sustainable-forest-management/toolbox/modules/use-of-treated-water-in-forestry-and-agroforestry/in-more-depth/en/>

García, A. (2024). Los incendios forestales en Ecuador dejan seis personas fallecidas y más de 44.000 animales muertos en 2024. *Primicias*. <https://www.primicias.ec/sociedad/incendios-forestales-ecuador-personas-fallecidas-animales-muertos-competencia-municipios-84087/>





García-Heras, F. G.-A.-M.-L.-C.-V.-M. (2025). Determinants of health and performance in wildland firefighters: A narrative review. *Journal of Functional Morphology and Kinesiology*, 10(1), 80. <https://doi.org/10.3390/jfmk10010080>

Guerra, M., & Thostrup, A. (2025). Firefighters' occupational exposures and health risks. *Toxics*, 13(5), 343. <https://doi.org/10.3390/toxics13050343>

Insausty, A., & Escobar, A. (2024). La crisis del agua en América Latina: Una emergencia que exige respuestas integrales. ResearchGate. [https://www.researchgate.net/publication/385863857\\_La\\_Crisis\\_del\\_Agua\\_en\\_America\\_Latina\\_Una\\_Emergencia\\_que\\_Exige\\_Respuestas\\_Integrales](https://www.researchgate.net/publication/385863857_La_Crisis_del_Agua_en_America_Latina_Una_Emergencia_que_Exige_Respuestas_Integrales)

International Organization for Standardization (ISO). (2020). ISO 16075-1: Guidelines for treated wastewater use for irrigation projects. <https://www.iso.org/standard/73482.html>

Kesari, K. K., Soni, R., Jamal, Q. M., Tripathi, P., Lal, J. A., Jha, N. K., . . . Ruokolainen, J. (2021). Wastewater treatment and reuse: A review of its applications and health implications. *Water, Air, & Soil Pollution*, 232(208). <https://doi.org/10.1007/s11270-021-05154-8>

Mannina, G., Gulhan, H., & Ni, B. (2022). Water reuse from wastewater treatment: The transition towards circular economy in the water sector. *Bioresource Technology*, 363(127951). <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.127951>

Ministerio del Ambiente del Ecuador. (2015). Acuerdo Ministerial 097: Reforma al Texto Unificado de Legislación Secundaria de Medio





Ambiente, Libro VI – Norma de calidad ambiental y de descarga de efluentes al recurso agua. <https://www.ambiente.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2018/05/Acuerdo-097.pdf>

Ministerio del Ambiente del Ecuador. (2017). Texto Unificado de Legislación Secundaria de Medio Ambiente (TULSMA). Decreto Ejecutivo 3516. Registro Oficial Edición Especial 2 de 31 de marzo de 2003. Última modificación: 29 de marzo de 2017. <https://www.ambiente.gob.ec/wpcontent/uploads/downloads/2018/05/TULSMA.pdf>

Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica. (2015). Reglamento a la Ley Orgánica de Recursos Hídricos, Usos y Aprovechamiento del Agua (Decreto Ejecutivo No. 650, Registro Oficial Suplemento 483, 20-abr.-2015; última modificación 21-ago.-2015). [https://www.regulacionagua.gob.ec/wpcontent/uploads/downloads/2016/09/REGULACI%C3%93N-DIR-ARCA-RG-004-2016.pdf?utm\\_source=chatgpt.com](https://www.regulacionagua.gob.ec/wpcontent/uploads/downloads/2016/09/REGULACI%C3%93N-DIR-ARCA-RG-004-2016.pdf?utm_source=chatgpt.com)

Navarro, K. (2020). Working in smoke: Wildfire impacts on the health of firefighters and outdoor workers and mitigation strategies. *Clinics in Chest Medicine*, 41(4), 763-769. <https://doi.org/10.1016/j.ccm.2020.08.017>

Navarro, K., Fent, K., Swan, R., & Tarley, J. (2024). A deeper look into protecting wildland firefighter safety and health. Centers for Disease Control and Prevention (CDC). <https://blogs.cdc.gov/niosh-science-blog/2024/04/29/wildland-ff-webinar>





OMS. (2013). Guidelines for the safe use of wastewater, excreta and greywater – Volume 4: Excreta and greywater use in agriculture. <https://www.who.int/publications/i/item/9241546859>

Parlamento Europeo y Consejo de la Unión Europea. (2020). Reglamento (UE) 2020/741 sobre los requisitos mínimos para la reutilización del agua. Diario Oficial de la Unión Europea. <https://www.boe.es/doue/2020/177/L00032-00055.pdf>

Partyka, M. B. (2022). Wastewater reuse for irrigation of produce: A review of research, regulations, and risks. *Science of the Total Environment*, 828(154385). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154385>

Riesenberger, B., Rodriguez, M., Marques, L., Cervantes, R., Gomes, B., Dias, M., . . . & Viegas, A. (2024). Filling the knowledge gap regarding microbial occupational exposure assessment in wastewater treatment plants: A scoping review. 12(6). <https://doi.org/10.3390/microorganisms12061144>

Secretaría Nacional de Gestión de Riesgos del Ecuador. (s.f.). Incendios forestales. <https://www.gestionderiesgos.gob.ec/incendios-forestales/>

Silva, J. (2023). Wastewater treatment and reuse for sustainable water resources management: A systematic literature review. *Sustainability*, 15(14), 10940. <https://doi.org/10.3390/su151410940>

Teixeira, T., Almeida, L., Dias, I., Santos Baptista, J., Santos, J., Vaz, M., & Guedes, J. (2024). Occupational chemical exposure and health status of wildland firefighters at the firefront: A systematic review. *Safety*, 10(3). <https://doi.org/10.3390/safety10030060>





Tezcan, B., & Eren, T. (2025). Forest fire management and fire suppression strategies: A systematic literature review. *Natural Hazards*, 121(9), 10485–10515. <https://doi.org/10.1007/s11069-025-07227-x>

Torretta, V., Katsoyiannis, I., Collivignarelli, M. C., Bertanza, G., & Xanthopoulou, M. (2020). Water reuse as a secure pathway to deal with water scarcity. *MATEC Web of Conferences*, 305(00090). <https://doi.org/10.1051/mateconf/202030500090>

UNESCO. (2024). Launch of an Atlas on the retreat of Andean glaciers and the reduction of glacial waters. <https://www.unesco.org/en/articles/launch-atlas-retreat-andean-glaciers-and-reduction-glacial-waters>

UNESCO World Water Assessment Programme. (2024). Informe mundial de las Naciones Unidas sobre el desarrollo de los recursos hídricos 2024: Agua para la prosperidad y la paz; datos, cifras y planes de acción. <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000396260>

United Nations Office for Disaster Risk Reduction (UNDRR). (2023). Wildfires in Latin America. <https://www.undrr.org/media/80887/download?startDownload=20251023>

Wah, W., Gelaw, A., Glass, D. C., Sim, M. R., Hoy, R. F., Berecki-Gisolf, J., & Walker-Bone, K. (2025). Systematic review of impacts of occupational exposure to wildfire smoke on respiratory function, symptoms, measures and diseases. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, 263(114463). <https://doi.org/10.1016/j.ijheh.2024.114463>





WaterReuse Los Angeles. (2021). Using recycled water for firefighting:

Protocol for the use of recycled water in fire suppression and training.

Los Angeles Chapter of the WaterReuse Association.

[https://watereuse.org/wpcontent/uploads/2022/02/Protocol\\_for\\_Using\\_Recycled\\_Water\\_for\\_Firefighting\\_-\\_2021.pdf](https://watereuse.org/wpcontent/uploads/2022/02/Protocol_for_Using_Recycled_Water_for_Firefighting_-_2021.pdf)

Yakamecan, E., Obijanya, C. C., Jayakrishnan, U., & Aygun, A. (2025). A

critical review of contaminants of emerging concern in reclaimed

wastewater: Implications for agricultural irrigation. *Water*

*Conservation Science and Engineering*, 10(3).

<https://doi.org/10.1007/s41101-025-00435-3>

