

Extintor recargable de agua presurizada: Una solución sostenible frente a incendios en espacios cerrados de fuego tipo A

Estiven Holguín Ochoa

Leidy Tatiana Nova Rubiano

Edgar Alberto Hoyos Gasca

Ingeniería Industrial, Corporación Universitaria Minuto de Dios

NRC: 60- 76818 Opción de grado

Ing. Andrés Felipe Reyes Giraldo

Diciembre, 2025

Extintor recargable de agua presurizada: Una solución sostenible frente a incendios en espacios cerrados de fuego tipo A

Estiven Holguín Ochoa

Leidy Tatiana Nova Rubiano

Edgar Alberto Hoyos Gasca

Ingeniería Industrial

Ing. Andrés Felipe Reyes Giraldo

Facultad de ingeniería, Corporación Universitaria Minuto de Dios.

Santiago de Cali

04 de diciembre de 2025

Agradecimientos

A Dios, por la claridad, la fortaleza, las oportunidades y la capacidad de discernimiento que hicieron posible la culminación de este trabajo. A mis padres, Gloria y Francisco, cuyo apoyo incondicional y cariño han sido fundamentales en cada paso de mi formación. A mi pareja, Diana, por su paciencia, apoyo, comprensión y compañía constante durante este proceso.

Extiendo mi agradecimiento a mi director de grado Ing. Mag. Johan Mina, por su dedicación, apoyo y guía académica, gracias a mis mentores, Ing. Angie Falla e Ing. Jorge Rojas, quienes con sus conocimientos y consejos fueron guía clave para el desarrollo de este trabajo, al Benemérito Cuerpo de Bomberos Voluntarios de Cali, por tan valioso aprendizaje y compromiso de acompañamiento y propulsión para esta investigación.

Finalmente, a mi compañero Estiven Holguín, con quien compartí esfuerzos, desafíos y aprendizajes que enriquecieron significativamente no solo este trabajo, sino también mi vida profesional.

L. Tatiana Nova Rubiano

Primeramente, a Dios por permitirme culminar esta etapa con salud y perseverancia. A mi familia, por ser el pilar fundamental y brindarme su apoyo incondicional en las largas jornadas de estudio y trabajo.

Este trabajo no es solo un requisito académico, es el resultado del esfuerzo conjunto de quienes creemos en la investigación e innovación al servicio de la comunidad. Quiero expresar mi más profunda gratitud al Benemérito Cuerpo de Bomberos Voluntarios de Cali por creer en este proyecto, por abrir sus puertas y brindar el soporte técnico, logístico y humano necesario para el desarrollo de las pruebas experimentales. A mis instructores y compañeros, cuya experiencia operativa fue vital culminar a satisfacción.

Finalmente, a mi director de trabajo de grado, Ing. Mag. Jhoan Alexis Mina Córdoba por su guía académica, rigor y paciencia, y a mi estimada compañera de estudio Tatiana Nova, su apoyo incondicional facilitó el camino para llegar hasta aquí.

Estiven Holguin Ochoa

En primer lugar, agradezco a Dios, porque en cada momento de incertidumbre, cansancio o caída, Él me sostuvo y me dio la fuerza para continuar. A mi familia, que es mi mayor tesoro: a mi madre, por su amor incondicional y su ejemplo de lucha; y a mi hija, “mi princesa mágica”, cuyo brillo y ternura fueron el motor que me impulsó incluso en los días más difíciles.

A mis jefes, gracias por brindarme el tiempo, la confianza y el espacio necesarios para avanzar en mis estudios. Quienes me apoyaron en cada etapa de mi proceso de formación.

Mi gratitud más profunda y emotiva son para mis compañeros de tesis Steven y Tatiana. No existen palabras que alcancen para dimensionar lo que hicieron por este proyecto. Su compromiso no fue solo profesional, sino humano; dedicaron incontables horas de trabajo, sacrificaron tiempo personal y aportaron una energía incansable que sostuvo este proyecto cuando parecía imposible avanzar.

Sin su entrega, su constancia y su fe en este objetivo, este trabajo simplemente no habría sido posible. Su apoyo fue un pilar, una guía y un ejemplo, y siempre estaré agradecido por todo lo que dieron para que hoy este sueño sea una realidad.

Agradezco también al director del proyecto, el Ing. Jhoan Alexis Mina Córdoba, por su orientación, su paciencia y su visión, que marcaron el rumbo correcto de esta investigación.

Mi reconocimiento al Cuerpo de Bomberos Voluntarios de Cali, por abrirnos sus puertas, brindarnos sus instalaciones, su personal y su maquinaria, elementos esenciales para el desarrollo de este estudio.

Finalmente, a todas las personas que, aunque no se mencionan de manera individual, acompañaron este proceso con palabras de aliento, gestos de apoyo o simples presencias significativas: gracias. Cada uno, desde su lugar, aportó algo invaluable en este camino hacia la obtención del título de Ingeniero Industrial.

Edgar Alberto Hoyos Gasca

Tabla de contenido

Agradecimientos.....	3
----------------------	---



Introducción	5
Planteamiento del problema	7
Justificación	8
Objetivos.....	9
Objetivo general	9
Objetivos específicos.....	9
Marco Teórico. Fundamentos Termodinámicos y Químicos del Fuego	10
Dispositivos y Agentes Extintores	10
Dinámica de Fluidos y Atomización	11
Procedimiento de Operación	12
Estado del arte - Antecedentes.....	13
Metodología	14
Hipótesis	17
H_1 (Hipótesis de investigación):.....	17
H_0 (Hipótesis nula):.....	17
Pregunta problema	18
Preguntas específicas.....	18
Resultados	18
Adaptación del sistema de extintor de agua a presión	18
Evaluación de desempeño y comparación con otros equipos de uso similar	23
Evaluación comparativa del tiempo, tasa de descarga y consumo.....	26
Evaluación comparativa del daño colateral.	30
Público objetivo.....	33
Impacto esperado	33
Conclusiones	34
Referencias	36

Introducción

La seguridad urbana enfrenta un reto cada vez mayor en la prevención y extinción de incendios tanto residenciales como estructurales. A pesar de que muchas ciudades de Latinoamérica informan aumentos constantes en estos acontecimientos, los datos locales muestran con más claridad la gravedad del problema. De acuerdo con los registros de emergencias de la Central de Operaciones y el Departamento de Emergencias del Cuerpo de Bomberos Voluntarios de Cali (Colombia), se presentaron fluctuaciones relevantes en la frecuencia de incendios estructurales entre 2021 y 2025: 370 en 2021, 359 en 2022, 417 en 2023, 316 en 2024 y, especialmente resaltante, 446 incidentes hasta el corte del treinta de septiembre en 2025; este último número representa el total más elevado durante este periodo.

Este comportamiento muestra que los incendios en viviendas y estructuras siguen siendo una de las emergencias más habituales, causando daños a la infraestructura, pérdidas materiales y exposición al humo tóxico. Diferentes informes de salud pública han señalado que, en circunstancias residenciales, la concentración de compuestos orgánicos volátiles (COVs) puede duplicar la cantidad que se encuentra en incendios industriales (Alharbi et al., 2021). Esto incrementa el riesgo para las personas que viven allí y para los bomberos encargados del control.

Los agentes extintores convencionales (como el agua, el polvo químico o ciertos gases) presentan limitaciones y desventajas significativas al momento de ser usados. Los extintores de polvo químico seco (PQS: mezcla de sales inorgánicas como fosfato monoamónico y bicarbonatos y aditivos como estearatos metálicos o siliconas), eficaces frente a fuegos de clase A, B y C, tienden a generar residuos corrosivos (Grant, 2018). Estos residuos comprometen superficies delicadas, alimentos, equipos electrónicos o documentos, lo que implica costos elevados de limpieza y recuperación y pérdida de patrimonio (Benfer & Williams, 2018). Además, su descarga puede reducir visibilidad considerablemente en espacios cerrados, dificultando las operaciones de evacuación o rescate.

A pesar de estas evidencias, existe una brecha significativa en la literatura técnica sobre dispositivos creados por cuerpos de bomberos locales en América Latina. Si bien normativas internacionales como la NFPA 10 (2018) establecen protocolos estrictos de desempeño y trazabilidad para equipos de supresión, las innovaciones desarrolladas

internamente suelen limitarse a validaciones empíricas informales. Esto resalta la necesidad imperante de que las instituciones bomberiles documenten y estandaricen sus propios desarrollos tecnológicos, sometiendo prototipos funcionales a análisis comparativos rigurosos que incluyan parámetros críticos como tiempo de extinción, eficiencia de consumo y daño colateral, para así validar su viabilidad operativa y sostenibilidad."

El Cuerpo de Bomberos Voluntarios de Cali realizó la adaptación y evaluación de un prototipo de extintor portátil de agua presurizada recargable con aire comprimido, basado en un modelo estándar de 2,5 galones ampliamente utilizado por cuerpos de bomberos en los Estados Unidos. La modificación tuvo como propósito mejorar la portabilidad, precisión de descarga y facilidad de recarga en campo, reduciendo al mismo tiempo la generación de residuos químicos y el riesgo de daños colaterales durante su uso.

El objetivo de este estudio es documentar y evaluar de forma exploratoria el desempeño operativo del prototipo bajo condiciones simuladas de fuego clase A, comparándolo con dos tipos de extintores comerciales: uno de agua con aditivo jabonoso (Pentrate al 1–5 %) y otro de polvo químico seco multipropósito (PQS ABC). El análisis se centró en variables de operación críticas tales como tiempo de extinción, tasa de descarga, consumo de agente extintor y área afectada, con el fin de determinar la viabilidad del dispositivo como herramienta complementaria para el control de fuegos incipientes.

Este trabajo contribuye al acervo local de innovación, propone mejoras operativas sostenibles y sienta las bases para estándares técnicos que permitan replicabilidad, una valoración ambiental más precisa y la potencial adopción por otros cuerpos de bomberos.

Planteamiento del problema

A pesar de los avances tecnológicos globales en la extinción de incendios, los cuerpos de bomberos en regiones como Latinoamérica continúan enfrentando limitaciones críticas relacionadas con la disponibilidad de equipos portátiles de última generación, la autonomía operativa y la capacidad de respuesta inmediata ante incendios incipientes, derivadas en gran medida de las brechas regulatorias y presupuestales del sector (Latam PCI, 2024).

En el contexto colombiano, el equipamiento de la mayoría de los cuerpos de bomberos se rige por adquisiciones institucionales alineadas a estándares como la NTC 2885 (ICONTEC, 2009), las cuales priorizan sistemas tradicionales de extinción (agua presurizada convencional o PQS). Si bien estos dispositivos cumplen con la normativa, presentan restricciones técnicas inherentes en términos de recarga en campo, precisión del chorro y control de flujo. Estas limitaciones operativas suelen derivar en tiempos de extinción más prolongados y un mayor consumo de agente extintor, incrementando el riesgo de daño colateral por saturación hídrica o residuos químicos corrosivos, lo que afecta gravemente la integridad de equipos eléctricos y estructuras sensibles (Grant, 2018; Benfer & Williams, 2018).

El problema se agudiza en contextos urbanos y residenciales donde los bomberos deben desplazarse con rapidez y operar en espacios reducidos. La carencia de dispositivos portátiles de despliegue ágil dificulta la intervención oportuna en la fase inicial del incendio, reduciendo drásticamente las probabilidades de contención antes de que se alcancen condiciones de flashover: combustión súbita generalizada (Madrzykowski & Dow, 2020). En consecuencia, surge la necesidad de diseñar, adaptar, complementar y validar tecnologías portátiles de bajo costo, recargables y adaptadas al entorno operativo local, que optimicen la eficiencia de extinción con un menor impacto ambiental y físico sobre el operador."

Justificación

El desarrollo y análisis del prototipo de extintor recargable de agua presurizada se justifica por su potencial para optimizar la eficiencia y sostenibilidad de las operaciones de extinción en escenarios reales. Este equipo busca reducir drásticamente el tiempo de respuesta y la cantidad de agente utilizado, factores identificados como críticos para lograr la contención temprana del fuego y evitar su propagación a fases incontrolables (Madrzykowski & Dow, 2020). Además, su diseño de transporte y sistema de abastecimiento de agua y presurización en campo permiten extender la autonomía operativa, disminuyendo la dependencia de recursos externos y los tiempos muertos entre intervenciones.

Desde la perspectiva ambiental y de seguridad humana, el uso de agentes a base de agua ofrece una alternativa limpia frente al Polvo Químico Seco (PQS), cuya toxicidad residual y complejidad de limpieza representan riesgos significativos para la salud de los operarios y la integridad de los ecosistemas urbanos (Grant, 2018). Finalmente, la implementación de esta tecnología adaptada en cuerpos de bomberos no solo fortalece la capacidad de respuesta institucional, sino que establece un precedente técnico para cerrar las brechas de equipamiento en Latinoamérica mediante la innovación local (Latam PCI, 2024)."

Objetivos

Objetivo general

Evaluar el desempeño operativo sostenible y la portabilidad del prototipo adaptado de extintor de agua presurizada recargable, desarrollado por el Cuerpo de Bomberos Voluntarios de Cali, mediante un análisis comparativo frente a dispositivos convencionales de supresión en incendios estructurales incipientes.

Objetivos específicos

- Caracterizar las adaptaciones tácticas del prototipo, detallando las especificaciones de la válvula de recarga neumática in-situ y el sistema de arnés de transporte, para establecer sus ventajas en términos de autonomía y portabilidad operativa.
- Determinar experimentalmente la eficiencia de extinción del prototipo frente a extintores convencionales (Agua a Presión y PQS ABC) en escenarios controlados de fuego Clase A, mediante la medición de variables críticas como tiempo de extinción, tasa de descarga, consumo de agente extintor y daño colateral.
- Analizar los datos experimentales mediante estadística descriptiva, identificando diferencias significativas en la eficiencia de supresión y consumo de agente; determinando los factores técnicos que expliquen el rendimiento diferencial del prototipo.
- Evaluar el daño colateral y post-incidente de los tres dispositivos de extinción considerando la generación de residuos, consumo hídrico y afectación sobre superficies no incendiadas.

Marco Teórico.

Fundamentos Termodinámicos y Químicos del Fuego

La combustión de materiales sólidos ordinarios (Clase A) es un fenómeno complejo que requiere la interacción sostenida de combustible, calor y oxígeno, descrita teóricamente mediante el triángulo del fuego. En estos materiales, el calor induce el pirólisis, un proceso de descomposición térmica que libera gases volátiles, los cuales se inflaman al alcanzar su temperatura de ignición en presencia de oxígeno. La continuidad de este proceso se explica a través del tetraedro del fuego, donde la reacción química en cadena de radicales libres mantiene la combustión autosostenida (Basset Blesa, 2009).

Desde la perspectiva de la dinámica del fuego, la extinción se logra al interrumpir la interacción de cualquiera de los cuatro componentes del tetraedro. Los mecanismos de supresión se clasifican en: eliminación de calor (enfriamiento), método primario de los agentes a base de agua debido a su capacidad de absorción térmica; aislamiento del oxígeno (sofocamiento), característico de las espumas formadoras de película o gases como el CO_2 ; remoción del combustible (separación); e interrupción de la reacción en cadena, siendo este último el mecanismo de acción predominante de los extintores de Polvo Químico Seco (PQS) al inhibir químicamente la combustión (Basset Blesa, 2009; NTC 2885, 2009).

Para la extinción efectiva en esta clase de incendios, el mecanismo predominante es el enfriamiento. El agua posee un calor latente de vaporización excepcionalmente alto (2260 kJ/kg a 100 °C), lo que le permite absorber grandes cantidades de energía térmica del combustible, reduciendo su temperatura por debajo del punto de pirólisis y evitando la reignición (Särdqvist, 2002).

Dispositivos y Agentes Extintores

Según la NFPA 10 (2018), un extintor se define como "un dispositivo portátil, rodante o transportado y accionado manualmente, que contiene un agente extintor que puede ser expulsado bajo presión con el propósito de suprimir o extinguir un fuego". Actualmente, la normativa técnica, como la NTC 2885 (ICONTEC, 2009), tipifica diversos agentes para fuegos Clase A:

Agua a Presión: Los extintores estándar de 2.5 galones (9.46 L) generan un chorro sólido con un alcance de 10.7–12.2 m y una descarga de aproximadamente 55 segundos. Aunque efectivos por saturación, su dependencia de sistemas de presurización industrial (nitrógeno) limita su recarga inmediata en operaciones de campo (NTC 2885, 2009).

Polvo Químico Seco (PQS ABC): Basado en fosfato monoamónico, actúa inhibiendo la reacción en cadena y sofocando el fuego al fundirse sobre la superficie caliente. Sin embargo, su capacidad de enfriamiento es limitada, lo que obliga a menudo al uso complementario de agua para incendios profundos. Además, genera residuos corrosivos y de difícil limpieza, lo que representa un impacto negativo en términos de daños colaterales y sostenibilidad (Grant, 2018).

Espumas y Aditivos (AFFF/Humectantes): Mejoran la tensión superficial del agua para penetrar combustibles porosos. No obstante, existe una creciente preocupación ambiental sobre ciertos compuestos fluorados presentes en espumas tradicionales, impulsando la búsqueda de alternativas más ecológicas o el uso eficiente de agua pura (Oke, 2012).

Dinámica de Fluidos y Atomización

La eficiencia del agua como agente extintor depende directamente de la relación superficie-volumen de las gotas. Un chorro sólido tradicional desperdicia un porcentaje significativo de agua por escurrimiento (run-off) sin participar en el enfriamiento. Por el contrario, la fragmentación del chorro en gotas más finas o niebla de agua (Water Mist) aumenta la superficie de contacto con el fuego, acelerando la absorción de calor y la conversión a vapor, lo que desplaza el oxígeno de forma efectiva. (Madrzykowski & Dow, 2020).

La presurización mediante aire comprimido, propuesta en este estudio, busca aprovechar los principios de la energía neumática almacenada para mantener una presión de descarga constante que optimice la atomización sin requerir gases propulsores inertes externos.

Procedimiento de Operación

La eficacia de cualquier dispositivo portátil de extinción de incendios depende de la técnica de aplicación. Según la NTC 2885 (2009), las maniobras que deben utilizarse son las siguientes:

Preparación y activación: Verificar que el extintor esté en condiciones operativas: sin daños visibles, con componentes completos y presión adecuada. Retirar el pasador de seguridad sujetando la manija, sostener la manguera o boquilla y efectuar una breve prueba de descarga con el equipo en posición vertical.

Puntería, distancia y barrido: Iniciar la descarga dentro del alcance efectivo del agente; por ejemplo, el chorro de agua a presión llega hasta 10,7–12,2 m, mientras que para polvos químicos secos la distancia recomendada suele ser de 1,5–2,4 m. Dirigir el agente a la base de las llamas y barrer lateralmente para abatir el frente, avanzando de forma controlada para humectar y penetrar el material sin salpicar ni desplazar combustible suelto. Se debe tomar siempre una posición a favor del viento para evitar la exposición térmica y la inhalación de humo.

Ángulo de aplicación: Para agentes adecuados a la Clase A (agua y espuma) no se prescribe un ángulo fijo; la prioridad es conseguir alcance, cobertura y penetración hacia el interior del combustible. Agentes como CO₂ pueden usarse en otras aplicaciones con técnicas aéreas en ángulos aproximados de 45° sobre áreas contenidas, pero no son idóneos para incendios Clase A.

Cierre y verificación: Una vez extinguidas las llamas, separar o remover material para descubrir puntos calientes, aplicar agua adicional para enfriar completamente y vigilar posibles reigniciones, especialmente cuando se empleó polvo multipropósito; la combinación polvo + agua suele ser necesaria para enfriar y asegurar la extinción.

Estado del arte - Antecedentes

La revisión bibliográfica permite contextualizar el funcionamiento de sistemas de agua presurizada y niebla frente a métodos tradicionales. Como referente inicial en el desempeño de agentes líquidos, Oke (2012) analiza comparativamente diversas concentraciones de agentes humectantes bajo estándares federales, concluyendo que variables como el diseño de la boquilla y la presión de trabajo son determinantes para la eficiencia de extinción. Este hallazgo es fundamental para el diseño metodológico del presente estudio, pues valida la necesidad de estandarizar estos parámetros al cotejar consumos y tiempos de respuesta.

En cuanto a la física del fluido, Liu et al. (2019) presentan un estudio experimental sobre las características del flujo de chorro *jet flow* en monitores de agua, resaltando cómo la atomización controlada aumenta la superficie de enfriamiento y reduce el daño colateral. Complementariamente, Hsieh et al. (2006) caracterizan el comportamiento del spray de agua en la supresión de fuego, demostrando que una distribución granulométrica fina (gotas de menor diámetro) optimiza la absorción de calor. Estos antecedentes teóricos proporcionan la base para comparar los patrones de descarga del prototipo desarrollado frente a las boquillas convencionales.

Huang et al. (2012) y Luo et al. (2025) investigan las propiedades de agentes a base de agua y el efecto sinérgico de aditivos y surfactantes para mejorar la humectabilidad en materiales combustibles. Sus resultados sugieren que, incluso sin cargas químicas agresivas, la optimización de la mezcla hídrica puede alcanzar rendimientos superiores.

En el ámbito de la seguridad residencial y la táctica operativa, Madrzykowski y Dow (2020) establecen que, mediante técnicas de ataque con caudal reducido (*reduced water flow*), es posible prevenir el *flashover* y mantener el control del fuego utilizando cantidades mínimas de agua. Este principio respalda la hipótesis central de esta investigación: un extintor portátil bien adaptado puede lograr una extinción eficiente sin el desperdicio hídrico asociado a equipos tradicionales.

Finalmente, para el contraste con equipos de polvo, Shalel et al. (2025) proponen metodologías recientes para analizar la optimización de extintores basados en polvo, lo que permite

establecer un marco comparativo riguroso entre la eficiencia másica del Polvo Químico Seco y la eficiencia térmica del agua presurizada propuesta en este prototipo.

Metodología

El estudio se desarrolló bajo un enfoque experimental y comparativo de carácter exploratorio, orientado a evaluar el desempeño operativo de un prototipo de equipo portátil para la extinción de incendios, desarrollado por el Cuerpo de Bomberos Voluntarios de Cali (Colombia). La metodología integra fases de diseño técnico, pruebas controladas y análisis cuantitativo de variables de desempeño, con el propósito de fundamentar empíricamente la eficiencia, fiabilidad y ventajas operativas del prototipo frente a los equipos convencionales disponibles.

El prototipo adaptado (extintor recargable de agua presurizada) fue concebido como respuesta a las limitaciones observadas en los extintores convencionales de agua a presión, particularmente en lo referente al control del chorro *jet flow*; factor que la literatura identifica como determinante para la eficacia de la supresión focalizada del incendios (Liu et al., 2019), la facilidad de transporte y la posibilidad de recarga directa en campo. En intervenciones reales, donde el tiempo de reacción y la maniobrabilidad del equipo determinan la eficacia de la respuesta, estos aspectos resultan críticos.

Para la fase experimental se realizaron ensayos comparativos utilizando tres equipos de naturaleza distinta: el extintor recargable de agua presurizada, que emplea agua presurizada con aditivo surfactante *Pentrate* al 1–5 %; un extintor convencional de agua presurizada con la misma composición y capacidad nominal (2,5 galones); y un extintor de polvo químico seco (PQS) multipropósito tipo ABC de 10 libras. La incorporación del agente surfactante responde a la necesidad fisicoquímica de reducir la tensión superficial del agua (pasando de ~ 72 mN/m a valores cercanos a 25 mN/m). Este mecanismo incrementa significativamente la humectabilidad *wettability* y la penetración en combustibles sólidos fibrosos, potenciando la disipación térmica y evitando la reignición (Luo et al., 2025; Bowes & Skeet, 1955)

Las pruebas se realizaron en las instalaciones de la Escuela Interamericana de Bomberos del Cuerpo de Bomberos Voluntarios de Cali - Colombia, en un ambiente

controlado, dentro de una estructura cerrada de 15 m² construida en concreto, con condiciones de ventilación y seguridad supervisadas por personal técnico del cuerpo de bomberos. El escenario experimental, como se muestra en la Figura 1, correspondió a un fuego Clase A, con un área de combustión de un metro cuadrado (1m²), en todas las pruebas se emplearon muebles compuestos por materiales convencionales como tela, espuma y madera, seleccionados por su representatividad en incendios estructurales de carácter residencial.

Las pruebas experimentales se llevaron a cabo en el campo de entrenamiento de la Escuela Interamericana de Bomberos (Cali, Colombia), utilizando una recámara (habitación) de 15 m² construida en concreto, bajo protocolos estrictos de ventilación y seguridad industrial. El escenario de incendio controlado, ilustrado en la Figura 1, se configuró como un fuego Clase A con un área de combustión de 1 m². Para la carga combustible, se estandarizó el uso de mobiliario compuesto por textiles, espuma de poliuretano y madera. Esta selección de materiales asegura la representatividad del ensayo frente a la carga combustible típica de entornos residenciales modernos, caracterizados por una rápida tasa de liberación de calor en sus fases iniciales (Madrzykowski & Dow, 2020)."



Figura 1: Escenario Experimental

La distancia de aplicación se fijó en 2,63 metros entre la boquilla del extintor y el centro de la fuente de ignición, con el fin de mantener la homogeneidad de las condiciones de descarga y minimizar la influencia de la dispersión o turbulencia del flujo. Cada ensayo fue documentado mediante registro audiovisual en alta resolución y medición digital del tiempo,

permitiendo el análisis detallado de la evolución de la llama, la estabilidad del chorro y el patrón de afectación superficial.

Para garantizar la consistencia de los ensayos, se estandarizó una distancia de aplicación de 2,63 metros entre la boquilla del extintor y el centro del foco de ignición. Esta medida, alineada con los rangos operativos de seguridad sugeridos por la NFPA 10 (2018), tuvo como objetivo principal minimizar la dispersión hidrodinámica y la turbulencia del flujo durante la descarga, aspecto claves para garantizar una aplicación estable y precisa del chorro (Liu et al., 2019). Cada prueba fue documentada mediante registro audiovisual de alta resolución y cronometría digital, facilitando un análisis posterior detallado sobre la cinética del comportamiento de los sistemas de extinción.

Para la evaluación de desempeño de los dispositivos, se definieron cuatro variables críticas: tiempo de extinción, tasa de descarga, consumo másico del agente extintor y área de daño colateral.

- Tiempo de extinción (s): Intervalo de tiempo en segundos cronometrado desde el inicio de la descarga hasta la completa supresión visible de la llama, indicador primario de la eficacia operativa.
- Tasa de descarga (Lb/s): Calculada conforme a los parámetros de flujo establecidos en la NTC 2885, 2009 para el dispositivo de PQS. Para los equipos a base de agua, se realizó la conversión técnica de unidades de volumen a masa, permitiendo la comparabilidad directa con el flujo másico del extintor de polvo químico.
- Consumo de agente extintor: Determinado a partir del producto entre la tasa nominal de descarga y el tiempo efectivo de operación.
- Área de daño colateral (m^2): Definida como la superficie circundante afectada por residuos del agente extintor fuera del foco de combustión, variable utilizada como indicador cualitativo y cuantitativo del impacto negativo en el ambiente, bienes y salud de las personas.

Cada equipo fue sometido a diez ensayos independientes bajo idénticas condiciones de encendido, presión inicial y distancia de aplicación. Tras cada prueba, se efectuó una

inspección visual del entorno, documentando residuos, humedad residual y grado de limpieza requerido. El conjunto de mediciones permitió establecer un promedio representativo y determinar el desempeño relativo de cada dispositivo.

Para garantizar la confiabilidad estadística, cada equipo fue sometido a una serie de diez ensayos independientes bajo condiciones idénticas de ignición, presión inicial y distancia de aplicación. Tras cada prueba, se procedió a la documentación del escenario mediante fotografía con escala de referencia, permitiendo la cuantificación digital del área de afectación y residuos mediante el software especializado SketchAndCalc®. Esta metodología de medición sin contacto, validada en contextos de investigación pericial por Schiks et al. (2023), aseguró la precisión objetiva en la determinación del daño colateral.

El consolidado de estos datos permitió no solo comparar la efectividad neta del prototipo frente a sus equivalentes convencionales, sentando bases empíricas sólidas para futuras optimizaciones en sistemas de respuesta rápida.

Hipótesis

Para la validación experimental del desempeño del prototipo, se plantearon las siguientes hipótesis de trabajo:

H_1 (Hipótesis de investigación):

El uso del prototipo de extintor de agua presurizada adaptado demuestra la eficiencia en la extinción de fuegos tipo A, reduciendo el tiempo de control del incendio y el daño colateral respecto a los extintores convencionales de polvo químico seco y de agua presurizada.

H_0 (Hipótesis nula):

No existen diferencias estadísticamente significativas en el tiempo de extinción ni en el área de afectación colateral entre el prototipo adaptado y los sistemas convencionales evaluados.

Pregunta problema

¿De qué manera el uso de un extintor recargable de agua presurizada adaptado, con sistema de recarga en sitio, puede incrementar la eficiencia en la extinción de fuegos tipo A y reducir el daño colateral en comparación con los sistemas convencionales de polvo químico seco y agua presurizada?

Preguntas específicas

- ¿Qué características técnicas del extintor recargable de agua presurizada influyen directamente en la reducción del tiempo de extinción del fuego tipo A?
 - ¿Cómo afecta el diseño del sistema de descarga del extintor recargable de agua presurizada y uniformidad del agente extintor?
 - ¿En qué medida el uso del extintor recargable de agua presurizada disminuye el daño colateral (temperatura residual y afectación del entorno)?
 - ¿Qué mejoras en la eficiencia del uso del agente extintor se observan frente a los extintores convencionales?

Resultados

Adaptación del sistema de extintor de agua a presión

El dispositivo evaluado constituye un sistema extintor portátil de agua presurizada con capacidad nominal de 2.5 galones (9.46 L), configurado para la supresión de fuegos Clase A bajo los parámetros de diseño y desempeño establecidos en la NFPA 10 (2018) y la NTC 2885 (2009). Esta adaptación tecnológica, desarrollada por el Cuerpo de Bomberos Voluntarios de Cali, integró un sistema de presurización neumática y componentes de portabilidad con el objetivo de habilitar la recarga rápida in situ, mejorar la maniobrabilidad y aumentando su capacidad operativa superando las restricciones de los equipos convencionales. A continuación, la Tabla 1 presenta la caracterización técnica comparativa entre las especificaciones del diseño estándar de fábrica y las adaptaciones funcionales implementadas en el prototipo.



Componente / Criterio	Extintor sin adaptación (Convencional Clase A)	Extintor con adaptación (Modificado)
1. Cuerpo del extintor	Cilindro certificado para agua a presión, acero inoxidable, con pruebas hidrostáticas y placa técnica.	Cilindro certificado para agua a presión, acero inoxidable, con pruebas hidrostáticas y placa técnica.
2. Válvula principal	Válvula estándar de extintor Clase A en bronce, con palanca y sello hermético.	Válvula estándar de extintor Clase A en bronce, con palanca y sello hermético.
3. Manómetro	Manómetro integrado para verificar presión interna.	Manómetro integrado para verificar presión interna.
4. Sistema de seguridad (pasador y precinto)	Incluye pasador y precinto normativo.	Incluye pasador y precinto normativo.
5. Manguera y boquilla	Manguera y boquilla estándar para chorro compacto.	Manguera y boquilla estándar para chorro compacto.
6. Tubo sifón interno	Tubo sifón diseñado según altura y capacidad del cilindro.	Tubo sifón diseñado según altura y capacidad del cilindro.
7. Capacidad útil	2,5 galones (9,46 L) de agua a presión.	2,5 galones (9,46 L) de agua a presión.
8. Presión de operación	Opera entre 100–125 psi según especificación de fábrica.	Opera a 125 psi según pruebas realizadas
9. Arnés de transporte	No incluido en el diseño original.	Se añade un arnés de transporte, permitiendo movilidad táctica del bombero.
10. Válvula de recarga	No posee sistema de recarga en campo.	Se instala una válvula de presurización, permitiendo llenado con aire comprimido directamente desde el vehículo de bomberos.

11. Potencial de certificación	Totalmente certificable según normas de extintores Clase A.	Conserva verificabilidad; la adición de la válvula de recarga puede evaluarse como mejora funcional sin afectar el cuerpo principal.
--------------------------------	---	--

Tabla 1: Tabla comparativa antes y después de la adaptación al equipo extintor

La Figura 2 muestra el prototipo del extintor recargable de agua presurizada; la imagen muestra que el cuerpo principal del cilindro está construido en acero inoxidable AISI 304, material seleccionado por su resistencia a la corrosión y estabilidad mecánica en condiciones térmicas variables (0,6–48,9 °C). Posee un acabado satinado anticorrosivo que minimiza adherencias de residuos y facilita la limpieza tras las intervenciones. El contenedor tiene una altura de 62,9 cm, diámetro de 17,8 cm y peso aproximado de 3,6 kg en vacío, lo que permite operación táctica por un solo bombero. La válvula principal es de bronce cromado con manija y palanca en acero inoxidable, componentes diseñados para soportar presiones de operación entre 100 y 125 psi sin deformación plástica ni fugas.

Como se ilustra en la Figura 2 el prototipo se desarrolló a partir de una plataforma base de extintor de agua presurizada comercial. El cuerpo principal del cilindro está construido en acero inoxidable AISI 304, material seleccionado por su alta resistencia a la corrosión y estabilidad mecánica en rangos térmicos operativos de 0,6 °C a 48,9 °C. Exteriormente, posee un acabado satinado que minimiza la adherencia de contaminantes y facilita la limpieza post-uso. El contenedor cuenta una altura de 62,9 cm, un diámetro de 17,8 cm y una masa en vacío aproximada de 3,6 kg, dimensiones que favorecen la maniobrabilidad táctica individual. La válvula principal es de bronce cromado con manijas de accionamiento en acero inoxidable, diseñado para operar bajo presiones nominales de trabajo entre 100 y 125 psi sin comprometer su integridad estructural.

El agente impulsor es aire comprimido, suministrado desde el compresor del vehículo de bomberos por medio de la válvula de presurización, lo que garantiza una presión constante y permite dejar operativo el equipo en campo sin necesidad de reemplazar cilindros. El sistema incluye una manguera flexible de servicio y boquilla de aplicación. Según la ficha técnica del extintor portátil de agua de 2,5 galones marca Badger, En apertura continua, el tiempo de

descarga nominal es de 55 segundos, con un alcance efectivo entre 9,1 y 13,7 metros, rango que permite intervenir incendios incipientes manteniendo una distancia segura del foco del incendio.



Figura 2: prototipo de sistema extintor portátil de agua a presión recargable

Uno de los desarrollos distintivos del extintor recargable de agua presurizada es el dispositivo de recarga rápida, que consiste en una válvula de presurización cilíndrica de aleación de aluminio con extremos en acero al carbono endurecido (ver Figura 2). Su cuerpo hexagonal facilita el ajuste controlado manualmente, mientras que sus roscas macho se conectan tanto a la válvula del extintor como al acople de la línea neumática del compresor del vehículo de Bomberos. Este diseño híbrido garantiza estanqueidad metal-metal sin necesidad de sellos elastoméricos, lo que prolonga la vida útil y reduce el riesgo de fugas durante operaciones repetidas de recarga. La Figura 3 muestra los aditamentos y el proceso de recarga del dispositivo in – situ; se puede observar que no se requiere una alta o compleja infraestructura para esta tarea; y que luego de múltiples pruebas se estimó que el tiempo de recarga se encuentra entre 5 a 7 minutos y solo una unidad de bomberos bastará para realizar



UNIMINUTO
Corporación Universitaria Minuto de Dios
Educación de calidad al alcance de todos
Vigilada MinEduación

VERY GOOD



la

tarea

de

recarga.



Figura 3: Proceso de recarga in-situ del sistema de extintor portátil de agua a presión recargable

El extintor recargable de agua presurizada incorpora un arnés de portabilidad tipo mochila, elaborado en reata sintética de poliéster y nailon de alta resistencia. Las correas distribuyen el peso del cilindro sobre hombros y caderas, reduciendo la fatiga muscular y mejorando la maniobrabilidad. El diseño incluye ganchos metálicos de sujeción y velcros de

ajuste que permiten adaptarlo a distintos usuarios. Este sistema incrementa la precisión del operador al dirigir el chorro, evitando humectación de zonas no afectadas. La Figura 4 muestra la forma para portar y transportar el extintor recargable de agua presurizada adaptado, esto mejora la movilidad y permite transportar otras herramientas manuales, fundamental para una respuesta más oportuna y efectiva por parte del bombero.



Figura 4: Portabilidad del sistema de extintor portátil de agua a presión recargable adaptado

Evaluación de desempeño y comparación con otros equipos de uso similar

Los ensayos comparativos entre los tres equipos de extinción evaluados como se muestra en la tabla 2; el dispositivo recargable de agua presurizada adaptado (agua presurizada + Pentrate, 2,5 gal), el extintor convencional de agua + Pentrate, y el extintor de polvo químico seco (PQS) multipropósito de 10 lb - permitieron analizar el desempeño operativo, la eficiencia hídrica, la maniobrabilidad del operador y los daños colaterales producidos durante la extinción de incendios clase A en un entorno controlado.



Característica	Extintor 2,5 gal Agua a Presión	Extintor 10 lb PQS ABC	Extintor Modificado Recargable en Sitio (Prototipo)
<i>Tipo de extintor</i>	Agua presurizada con aditivo penetrante	Polvo Químico Seco (PQS) ABC	Agua presurizada recargable en sitio
<i>Clase de fuego</i>	Clase A	A, B y C	Clase A
<i>Material del cilindro</i>	Acero inoxidable	Acero Cold Rolled con pintura electrostática	Acero inoxidable AISI 304 con acabado satinado anticorrosivo
<i>Agente extintor</i>	Agua con aditivo penetrante	Bicarbonato de sodio	Agua con aditivo penetrante
<i>Agente expelente</i>	Nitrógeno (N ₂)	Nitrógeno (N ₂)	Aire comprimido proveniente del vehículo de bomberos
<i>Presión de servicio</i>	125 psi	150 psi	100–120 psi
<i>Prueba hidrostática</i>	375 psi	450 psi	No aplica (prototipo adaptable, validado en pruebas operativas)
<i>Sistema de válvula</i>	Válvula en bronce, manómetro metálico	Válvula de bronce de 30 mm, manómetro metálico	Válvula de bronce cromado; manija y palanca en acero inoxidable

<i>Accesorios</i>	Manguera termoplástica de 1/2"	Manguera y boquilla para dispersión de PQS	Manguera flexible de servicio
<i>Alcance de descarga</i>	9–12 m	2–6 m	9,1–13,7 m
<i>Tiempo de descarga</i>	60 s	11,03 s	55 s
<i>Peso total cargado</i>	12,3 kg	5,8 kg	12,0 kg
<i>Dimensiones</i>	46 cm altura / 18 cm diámetro	45 cm altura / 12,8 cm diámetro	62,9 cm altura / 17,8 cm diámetro
<i>Uso en presencia de electricidad</i>	Apto para Clase A; sin propiedades dieléctricas certificadas	Apto para Clase C (no recomendado sobre sistemas sensibles)	Apto para Clase A; sin propiedades dieléctricas certificadas
<i>Normas relacionadas</i>	NTC 2361, NTC 2885, NFPA 10	NTC 652, NTC 1916	Cumplimiento funcional bajo UL 2-A y NFPA 10 (prototipo)
<i>Aplicación recomendada</i>	Materiales sólidos combustibles	Riesgos mixtos: sólidos, líquidos inflamables y electricidad	Intervención rápida con recarga en campo y bajo daño colateral

Tabla 2: Tabla comparativa de los equipos de extinción evaluados

Evaluación comparativa del tiempo, tasa de descarga y consumo.

El conjunto de ensayos permitió establecer diferencias significativas en el desempeño operativo de los tres tipos de extintores evaluados frente a un fuego Clase A de 1 m² bajo condiciones experimentales homogéneas. Los resultados obtenidos se presentan en la Figura 5, donde se registran los valores promedio de tiempo total de extinción, tasa de descarga y consumo del agente extintor.

Para determinar el volumen de agente extintor consumido por cada equipo probado, se estandarizaron las tasas de descarga nominales. Para los extintores a base de agua a presión tanto en el prototipo y el convencional, se emplearon los datos de la ficha técnica del extintor de referencia Badger WP-61, la tasa nominal se calculó dividiendo el volumen del contenido 9.46 L (2.5 galones) entre el tiempo total de descarga de 55 segundos, dando como resultado una tasa de descarga de 0.172 L/s, convirtiendo los valores en términos de masa con el fin de hacer las comparaciones pertinentes con los datos del equipo de polvo químico seco (PQS material sólido particulado), se tomó como referencia que 1 Litro de agua equivalen aproximadamente 1 kilogramo/2.2 libras, de esta manera, se obtuvo que la tasa estandar de descarga de los extintores de agua es de 0.379 Lb/s.

En el Extintor de Polvo Químico Seco (PQS ABC), la Norma Técnica Colombiana (NTC 2885, 2009) establece que, para efectos de clasificación, los extintores de polvo deben tener una tasa de descarga no menor a 0.45 kg/s (1 libra/segundo).

El consumo total de cada equipo se calculó multiplicando la tasa nominal por el tiempo promedio total de extinción registrado en los ensayos. En la tabla 3 se muestra el resumen de los resultados obtenidos.

Extintor	Agente	t extinción (s)	Tasa Nominal	Consumo Agente
1. Prototipo	Agua presurizada + pentrate	3 s	0.379 lb/s	1.15 lb

2. Convencional	Agua presurizada + pentrate	4 s	0.379 lb/s	1.52 lb
3. PQS ABC	Polvo Químico Seco	9 s	1 lb/s.	8.93 lb

Tabla 3: Resumen de resultados evaluación comparativa

Los tiempos de extinción oscilaron entre 3 y 9 segundos, evidenciando que todos los equipos fueron capaces de suprimir el fuego de forma efectiva, aunque con diferencias operativas relevantes. El extintor recargable de agua presurizada adaptado presentó el menor tiempo de extinción (3 s), lo que indica una acción más rápida frente al incendio.

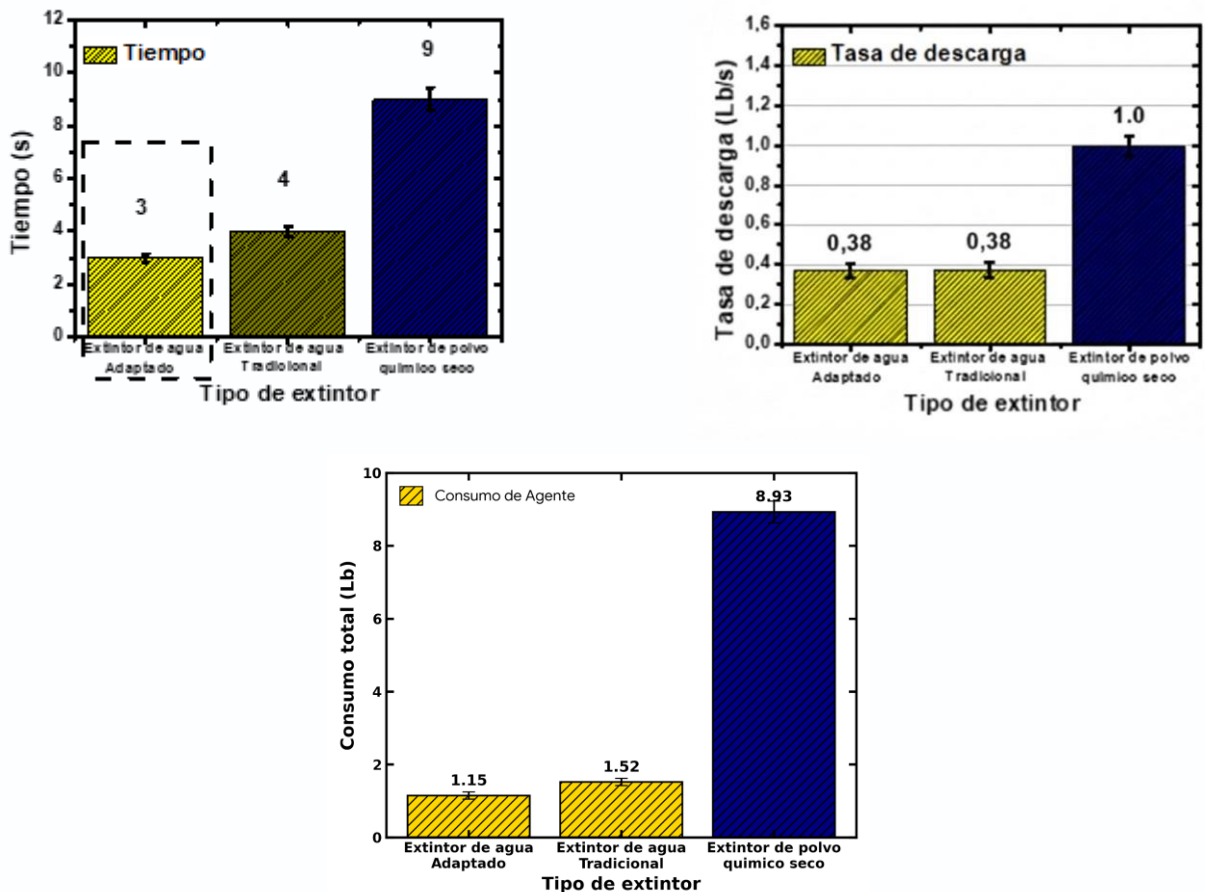


Figura 5: Evaluación de tiempos de extinción, tasa de descarga y consumo en función del tipo de extintor

El desempeño comparativo de los tres equipos ensayados mostró diferencias sustanciales. El prototipo logró extinguir el fuego en solo 3 s, frente a los 4 s del extintor de agua convencional y los 9 s del extintor de polvo químico seco (PQS ABC). Este resultado evidencia una mayor eficiencia operativa del prototipo adaptado, atribuible a la presión estable y mejor

maniobrabilidad concentrando efectivamente el patrón de descarga. En investigaciones experimentales se ha demostrado que una mayor presión de salida del chorro aumenta la energía cinética de las partículas de agua, lo que mejora la penetración frente al fuego (Madrzykowski & Dow, 2020).

Por su parte, el extintor PQS de 10 lb requirió el mayor tiempo de acción (9 s), con abundante residuo químico sobre las superficies, lo que representó riesgo para equipos electrónicos y la salud respiratoria. La eficacia moderada del PQS frente a combustibles sólidos tipo A se explica porque el mecanismo principal de este agente es la inhibición química de la reacción en cadena más que el enfriamiento del material combustible (NTC 2885, 2009).

Aunque los polvos ABC presentan alta versatilidad, su efectividad depende de una correcta distribución del material y de condiciones ambientales, como la velocidad y sentido del viento, experiencia técnica del operador entre otras, variables difíciles de garantizar en incendios de materiales combustibles convencionales (NTC 2885, 2009).

Complementariamente, se evaluó la masa total requerida de agente extintor para el control total del incendio incipiente. Tal como lo muestra La Figura 5, la diferencia entre el consumo de material entre los equipos evaluados evidencia la superioridad de la eficiencia termodinámica del agua frente a la acción química del polvo en este tipo de escenarios. Mientras que el extintor de PQS ABC demandó la descarga de 8.93 Lb de agente para lograr el control (debido a la necesidad de saturación superficial para interrumpir la reacción en cadena), los dispositivos hídricos alcanzaron el mismo objetivo operativo utilizando apenas una fracción de dicha masa.

Específicamente, el prototipo adaptado registró el desempeño más eficiente de toda la fase experimental, con apenas 1,15 Lb de agua utilizada. Este valor representa una reducción sustancial del 87% en la masa descargada en comparación con el extintor de PQS (8,93 Lb). Asimismo, al contrastarlo con el extintor de agua tradicional (1.52 Lb), el prototipo evidenció una optimización del 24% en la eficiencia de aplicación. Esta mejora se atribuye técnicamente a la estabilidad del apuntamiento facilitada por el nuevo sistema de arnés de transporte, cuya comodidad permite al operador mantener una dirección de descarga más precisa y sostenida sobre la base del fuego.

La evaluación cualitativa de la maniobrabilidad operativa evidenció que el prototipo adaptado ofrece ventajas ergonómicas significativas frente a los equipos de transporte manual convencional. La integración del sistema de arnés permite una distribución balanceada de la carga en el torso del operador, mejorando la estabilidad durante el desplazamiento y uso. Este accesorio facilita la liberación de las extremidades superiores, reduciendo la fatiga física y permitiendo la sujeción de pasamanos durante el ascenso por estructuras verticales (escaleras) o el transporte simultáneo de herramientas de entrada forzada como un hacha o una barra, tal como ilustra la Figura 6. Estos factores funcionales influyeron positivamente en la velocidad de despliegue y en la precisión del ataque inicial, superando las limitaciones de movilidad inherentes al diseño de los extintores convencionales que requieren ocupación manual permanente para su porte.



Figura 6: Operador transportando el prototipo por escaleras

De esta forma, los resultados permiten concluir que el prototipo ofrece un equilibrio favorable entre rapidez de respuesta, facilidad de operación y adaptabilidad táctica, aunque su diseño requiere optimización del caudal para reducir el consumo de agente y el área de humectación no deseada. Los hallazgos experimentales respaldan su potencial como

alternativa eficaz para la primera respuesta en incendios incipientes, especialmente en entornos donde la portabilidad y la recarga rápida son determinantes para la continuidad operativa.

Evaluación comparativa del daño colateral.

Para efectos de este estudio, el daño colateral se definió como la zona circundante afectada por el material residual de cada extintor luego de la extinción del incendio incipiente, como el polvo químico seco (material particulado) y agua jabonosa. La relevancia del daño colateral dentro de las evaluaciones de desempeño realizadas es principalmente la de determinar cualitativa y cuantitativamente el impacto negativo sobre las superficies donde se ha requerido el uso de un extintor portátil para controlar un incendio, y de esta manera establecer cual equipo es más eficiente o menos perjudicial en términos de generación de residuos contaminantes, uso del recurso hídrico y riesgo a la salud de las personas.

Para determinar el daño de forma cuantitativa se empleó el método de Estimación Geométrica por Referencia de Objeto Estándar, donde por medio de una escala de referencia en una imagen, este caso la fotografía del escenario de prueba luego de extinguido el incendio con el extintor de polvo químico seco (PQS) y de agua presurizada, se pudo obtener las medidas reales en metros cuadrados con un margen de error muy reducido, logrando calcular el daño generado por los residuos de estos equipos en una superficie. Estudios como el del Schiks et al. (2023) validan este método desde un contexto forense y de ingeniería. Con base en esta técnica de estimación de área a partir de una imagen con referencia, se empleó la herramienta digital SketchAndCalc® que permite calcular con precisión las áreas irregulares de imágenes, planos o fotografías en línea, acepta formatos de imagen como PNG, JPEG y PDF.

De esta manera se precisó que las áreas afectadas por el uso de los extintores probados, tal como lo muestra la Figura 7, fue de 2,1 m² para el prototipo de extintor de agua presurizada adaptado, 2,4 m² para el equipo de agua a presión convencional y el extintor de polvo químico seco (PQS) logró un área de afectación de 10,8 m², demostrando que el agente de extinción de este equipo es el más perjudicial para el ambiente y las personas, frente a los equipos a base de agua, su afectación en casi cinco veces mayor y resaltando que es un material corrosivo. Esta dispersión excesiva es inherente a la física del polvo fluidizado, que, al ser descargado a presión, crea una especie de nube que se asienta sobre superficies horizontales

y verticales distantes al conato, contaminando mobiliario y equipos no involucrados en el fuego Grant (2018).

De acuerdo a las pruebas realizadas, el uso de metodologías y aplicaciones digitales para calcular el daño colateral es evidente que los agentes utilizados por cada extintor presentan cualidades que determinan su eficiencia, tanto en la tarea principal que es el control del incendio, pero también en las consecuencias luego de su uso (post-incidente), según Grant (2018), el residuo de fosfato monoamónico disperso requiere una limpieza especializada inmediata para evitar la corrosión de metales y daños electrónicos, elevando los costos ocultos de la emergencia. Por otro lado, el prototipo, al limitar el área afectada a un perímetro mínimo y utilizar un agente inerte como el agua, valida su eficiencia como un equipo ideal para entornos residenciales y comerciales, donde la preservación de los bienes y cuidado a la salud es tan prioritaria como el control del fuego mismo.

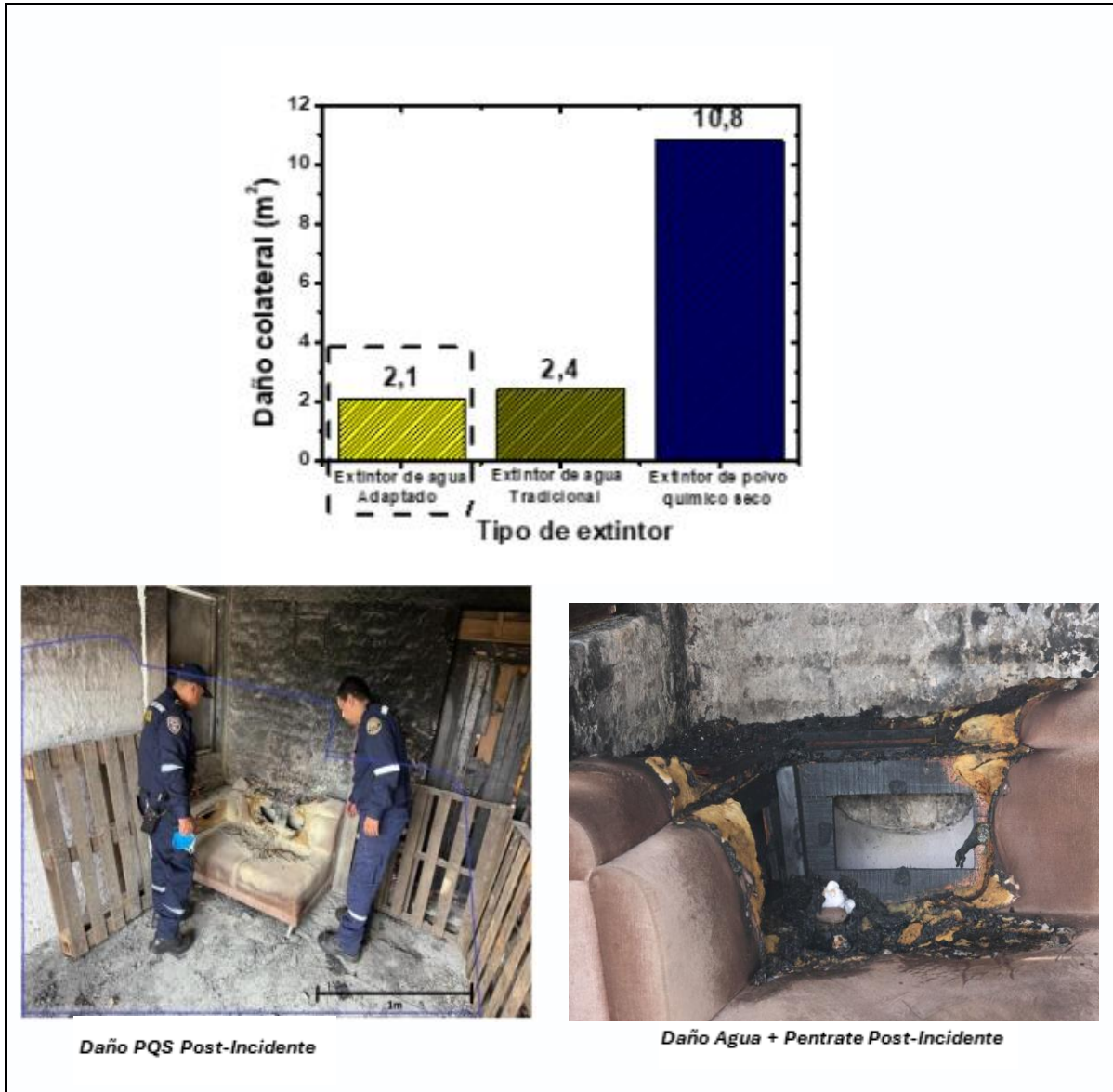


Figura 7: Daño colateral en función del equipo de extinción utilizado

En términos de impacto al medio ambiente y post - uso, los resultados confirman que los extintores a base de agua con surfactantes (sustancia jabonosa) presentan una huella ecológica mucho menor que los basados en polvos químicos. El Pentrate siendo una sustancia jabonosa fácil de obtener de los productos de limpieza de uso doméstico e industrial, reduce la tensión superficial del agua, favoreciendo la humectación profunda y el enfriamiento uniforme del combustible, lo que aumenta la eficiencia térmica sin requerir aditivos tóxicos (Bowes & Skeet, 1955). Además, el residuo líquido resultante es biodegradable, mientras que los polvos de fosfato monoamónico y sulfato de amonio del PQS requieren una limpieza exhaustiva y generan residuos sólidos no reutilizables.

Como señalan Madrzykowski y Dow (2020), la clave para una extinción sostenible no radica en el volumen masivo de agua, sino en la capacidad de absorción térmica del chorro; un exceso de flujo no contribuye a la extinción, sino que genera desperdicio. El prototipo desarrollado demuestra que, mediante una presurización neumática adecuada y una técnica de aplicación precisa, es posible reducir el consumo de agua en un 24% frente a equipos convencionales de su misma clase, sin comprometer la seguridad.

Público objetivo

Este proyecto se ha creado específicamente para los cuerpos de bomberos que lidian con emergencias por incendio en áreas urbanas, industriales y rurales. En el valle del Cauca hay 52 cuerpos de bomberos, 61 estaciones de bomberos y 80 máquinas; solo en la ciudad de Santiago de Cali existen diez estaciones de bomberos, que equivalen al 16,39% del total en el departamento. El prototipo es una herramienta diseñada para asistir en las fases iniciales de la lucha contra el fuego, lo que facilita a los bomberos actuar con mayor rapidez y eficiencia. El desarrollo se enfoca en optimizar un extintor, de manera que pueda recargarse en el mismo lugar donde ocurre la emergencia.

El propósito de esta innovación es reducir el tiempo y los costos de recarga habituales, aunque no busca sustituir a los extintores convencionales. En cambio, su objetivo es reforzar la capacidad de adaptarse a distintas situaciones de emergencia y proporcionar más opciones a los bomberos, complementando al equipo actual. En consecuencia, se planea dotar a cada máquina de bomberos con un extintor, lo que significa un total de 29 extintores recargables de agua presurizada para Santiago de Cali y 51 para el resto del Valle del Cauca.

Impacto esperado

La implementación de este extintor recargable de agua presurizada beneficiará, en primera instancia, a los cuerpos de bomberos, que dispondrán de un instrumento mucho más conveniente y sencillo de recargar en el mismo lugar de la emergencia. Esto les posibilitará operar con rapidez y sostener su operatividad a lo largo de múltiples intervenciones, sin la necesidad de talleres externos o equipos de apoyo, lo cual significa una mayor eficacia y un riesgo reducido en la confrontación de incendios. Por otro lado, en el campo académico, la

invención del extintor promueve la innovación y el aprendizaje aplicado a la ingeniería, incluyendo saberes sobre seguridad industrial, diseño funcional y sostenibilidad. Este proyecto tiene el potencial de motivar investigaciones futuras que busquen optimizar las tecnologías para responder ante situaciones de emergencia. Por último, el efecto positivo llega a toda la sociedad y al ambiente, dado que una respuesta más rápida frente a incendios contribuye a salvaguardar vidas, bienes y el medioambiente; esto se logra disminuyendo la expansión del fuego y atenuando el perjuicio medioambiental que generalmente producen las emisiones y los residuos de la combustión.

Conclusiones

Durante las pruebas tácticas controladas, el equipo mostró un chorro de alta estabilidad, con mínima dispersión lateral y capacidad de concentración sobre el foco del incendio. El flujo laminar obtenido bajo presiones de 120 psi permitió un patrón de aplicación uniforme, lo que se tradujo en una menor tasa de consumo de agua respecto a los extintores convencionales. La facilidad de recarga in situ, sumada a la ausencia de residuos químicos, se evidenció como un avance significativo en términos de sostenibilidad y disponibilidad operativa.

En síntesis, los resultados de caracterización estructural y funcional demuestran que el prototipo de extintor modificado combina eficiencia hidráulica, durabilidad de materiales, seguridad operativa y reducción del impacto ambiental, posicionándose como un equipo viable para implementación táctica en emergencias urbanas e industriales donde el acceso al recurso hídrico y la rapidez de respuesta son críticos.

También es fundamental resaltar que, gracias a la capacidad del prototipo de producir un chorro más controlado y dirigido, se favorece directamente el empleo más racional del recurso hídrico en las intervenciones. El equipo optimiza cada litro empleado al disminuir las pérdidas por dispersión no intencionada, escurrimiento y atomización, lo que es particularmente importante en situaciones donde el suministro de agua depende de camiones cisterna o su disponibilidad es escasa. La eficacia hidráulica, junto con su método de recarga en la ubicación, contribuye a un valor importante desde el punto de vista de la sostenibilidad

operativa. Esta disminuye el impacto hídrico vinculado al manejo de emergencias y fomenta prácticas más responsables en la gestión del agua por los cuerpos de bomberos.

En las pruebas que se han hecho a lo largo del año 2025 en las diferentes emergencias que atienden el Cuerpo de Bomberos Voluntarios de Cali, la efectividad donde se ha utilizado (casos de incendios incipientes “en la fase inicial de un incendio”) ha funcionado muy bien, sobre en todos los casos que este incendio incipiente no ha requerido el despliegue de mangueras, y su ubicación ha permitido su efectividad.

Referencias

Alharbi, B. H., Pasha, M. J., & Al-Shamsi, M. A. S. (2021). Firefighter exposures to organic and inorganic gas emissions in emergency residential and industrial fires. *Science of The Total Environment*, 770, 145332. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145332>

Basset Blesa, J. M. (2009). *Flashover: Desarrollo y Control*. Agencia de Servicios de Rescate Suecia / Cepreven.

Benfer, M., & Williams, E. (2018). Assessing the Impact of Fire Extinguisher Agents on Cultural Resource Materials. *Fire Technology*, 54(1), 289–311. <https://doi.org/10.1007/s10694-017-0684-9>

Bowes, P. C., & Skeet, G. (1955). *The use of wetting agents for the extinction of fire: Part II. The extinction of fire in fibrous materials* (Fire Research Note No. 213). Joint Fire Research Organization.

Grant, C. C. (2018). Portable Fire Extinguishers. En M. J. Hurley, D. T. Gottuk, J. R. Hall Jr., K. Harada, K. M. Kuligowski, M. Puchovsky, J. M. Watts Jr., y W. A. Webb (Eds.), *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering* (5.ª ed., pp. 3365–3385). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-1-4939-2565-0>

Hsieh, T.-L., Wu, Y.-L., Ho, M.-C., & Chung, K.-C. (2006). Characterization of Water Spray on Fire Suppression. *JSME International Journal Series B*, 49(2), 490–497. <https://doi.org/10.1299/jsmeb.49.490>

Huang, Y., Wencheng, Z., Dai, X., & Zhao, Y. (2012). Study on Water-based Fire Extinguishing Agent Formulations and Properties. *Procedia Engineering*, 45, 649–654. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.08.217>

ICONTEC. (2009). *NTC 2885: Extintores portátiles contra incendios* (2.ª actual.). Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación.

Kim, T.-S., Park, T.-H., Park, J.-H., Yang, J.-H., Han, D.-H., Lee, B.-C., & Kwon, J.-S. (2024). Thermal characteristics of fire extinguishing agents in compartment fire suppression. *Science Progress*, 107(3). <https://doi.org/10.1177/00368504241263435>

Liu, X., Wang, J., Li, B., & Li, W. (2019). Experimental study on jet flow characteristics of fire water monitor. *The Journal of Engineering*, 2019(13), 150–154. <https://doi.org/10.1049/joe.2018.8950>

Luo, X., Fang, X., Liu, J., Liu, H., Zou, J., Xu, Y., Liang, X., & Sun, W. (2025). Synergistic effects of surfactant blends on lignite dust wettability. *PLOS One*, 20(8), e0328657. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0328657>

Madrzykowski, D., & Dow, N. (2020). *Residential Flashover Prevention with Reduced Water Flow: Phase 1*. UL Firefighter Safety Research Institute. <https://doi.org/10.54206/102376/JEGF7178>

NFPA. (2018). *NFPA 10: Standard for Portable Fire Extinguishers*. National Fire Protection Association.

Red Latinoamericana de Protección Contra Incendios. (2024). *Reporte de actualidad regulatoria en protección contra incendios en Latinoamérica*. Latam PCI. <https://latampci.com/>

Särdqvist, S. (2002). *Water and other extinguishing agents*. Räddningsverket (Swedish Rescue Services Agency).

Schiks, L. A. H., Cook, M., Lipman, L. R., van Dijke, A. P., Hutchinson, K., van den Hoven, P., & Loeve, A. J. (2023). Contactless Size Reference in Forensic Photography — Design and Verification of the Novel FreeRef-1 System. *Sensors*, 23(8), 3790. <https://doi.org/10.3390/s23083790>

Shalel, A., Katoshevski, D., & Bar-Kohany, T. (2025). Methodology for Analyzing Powder-Based Fire Extinguishing and Its Optimization. *Fire*, 8(1), 22. <https://doi.org/10.3390/fire8010022>



UNIMINUTO
Corporación Universitaria Minuto de Dios
Educación de calidad al alcance de todos
Vigilada MinEduación



Shou-Ping, H., & Kee-Chiang, C. (2005). The Effect of Additive on the Fire Extinguishing Improvement of Water Mist Spray. *Journal of Applied Fire Science*, 14(1), 1–11. <https://doi.org/10.2190/A504-6927-0638-5655>