



Prevención de riesgos ocupacionales asociados a la exposición al humo, sustancias químicas y contaminantes en bomberos, mediante programas de seguridad, control ambiental y salud.

Prevention of occupational risks associated with exposure to smoke, chemicals and pollutants in firefighters, through safety, environmental control and health programs.

Carlos Edwin Mendoza Alarcon¹ 
cemendoza@itsoriente.edu.ec.

Instituto Superior Tecnológico Oriente (ITSO)
Riobamba, Ecuador

Benjamín Gabriel Quito Cortez² 
benjaminquito@bqc.com.ec

Instituto Superior Tecnológico Oriente (ITSO)
Riobamba, Ecuador

Daniela Fernanda Vásconez Duchicela³ 
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: Mendoza, C. Quito, B. Vásconez, D. (2026). **Prevención de riesgos ocupacionales asociados a la exposición al humo, sustancias químicas y contaminantes en bomberos, mediante programas de seguridad, control ambiental y salud.** *Metrópolis. Revista de Estudios Globales Universitarios*, 7 (1), pp. 2088-2131.

¹ Tecnólogo Superior en Control de Incendios y Operaciones de Rescate (ITECSUR); Tecnólogo en seguridad y salud ocupacional. Instituto Superior Tecnológico Oriente (ITSO); Maestrante en Herramientas de Seguridad Industrial y Salud en el Trabajo. (ITSO).

² 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.

³ 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

El presente artículo de revisión bibliográfica analiza la evidencia científica disponible sobre las medidas de prevención de riesgos ocupacionales asociados a la exposición al humo, sustancias químicas y contaminantes en el personal operativo de cuerpos de bomberos. La pregunta de investigación indaga qué conjunto de medidas reduce con mayor solidez la exposición ocupacional y con qué indicadores es posible demostrar dicha reducción. Mediante una revisión documental integrativa de literatura publicada entre 2019 y 2025 en bases de datos especializadas como PubMed, Scopus y Web of Science, se identificaron las principales estrategias de control basadas en la jerarquía de controles ocupacionales. En 2022, la Agencia Internacional para la Investigación sobre el Cáncer reclasificó la exposición ocupacional como bombero al Grupo 1 (carcinógeno confirmado para humanos), con evidencia suficiente para cáncer de vejiga y mesotelioma, lo que sitúa la prevención primaria como prioridad estratégica del servicio. Los hallazgos revelan que los programas integrales articulan tres niveles de intervención: controles de ingeniería en estaciones (sistemas de extracción de emisiones diésel que reducen el carbono elemental en bahías), controles administrativos (zonificación, verificación atmosférica, procedimientos de descontaminación estructurada) y barreras personales (uso continuo del equipo de respiración autónoma durante todas las fases operativas, incluida la remoción). La descontaminación del equipo de protección personal con agua y jabón demuestra eficacias del 85% en remoción de hidrocarburos aromáticos policíclicos. La absorción dérmica constituye una ruta significativa de exposición que requiere intervenciones específicas de protección y descontaminación. El biomonitoreo mediante metabolitos urinarios permite evaluar de manera objetiva la efectividad de las intervenciones preventivas implementadas. **Palabras clave:** exposición ocupacional, bomberos, carcinógenos, equipo de protección personal, descontaminación.

Abstract

This literature review article analyzes the available scientific evidence on occupational risk prevention measures associated with exposure to smoke, chemicals and pollutants in fire department operational personnel. The research question investigates which set of measures most effectively reduces occupational exposure and which indicators can demonstrate such reduction in actual field practice. Through an integrative documentary review of literature published between 2019 and 2025 in specialized databases such as PubMed, Scopus, and Web of Science, the main control strategies based on the hierarchy of occupational controls were identified and critically assessed. In 2022, the International Agency for Research on Cancer reclassified occupational exposure as a firefighter to Group 1 (confirmed human carcinogen), with sufficient evidence for bladder cancer and mesothelioma, positioning primary prevention as a strategic priority for the fire service. Findings reveal that comprehensive programs articulate three levels of intervention: engineering controls at stations (diesel emission extraction systems that reduce elemental carbon in apparatus bays), administrative controls (zoning, atmospheric verification, structured decontamination procedures), and personal barriers (continuous use of self-contained breathing apparatus during all operational phases, including overhaul). Personal protective equipment decontamination with soap and water demonstrates 85% effectiveness in polycyclic aromatic hydrocarbon removal. Dermal absorption constitutes a significant exposure route requiring specific targeted interventions, with studies showing contamination concentrations on firefighters' skin ranging from 2.23 to 62.50





ng/cm² on the neck area. Evidence also shows the presence of per- and polyfluoroalkyl substances in PPE textiles as a secondary exposure source requiring specific management strategies. Biomonitoring through urinary metabolites enables objective evaluation of implemented intervention effectiveness. **Keywords:** occupational exposure, firefighters, carcinogens, personal protective equipment, decontamination.

Introducción.

La labor de los bomberos se desarrolla en entornos cambiantes donde el humo y los subproductos de la combustión, que comprenden mezclas complejas de gases, vapores y partículas, pueden generar efectos agudos y crónicos en la salud. En 2022, la Agencia Internacional para la Investigación sobre el Cáncer (IARC) clasificó la exposición ocupacional como bombero como carcinógena para humanos (Grupo 1), con evidencia suficiente para cáncer de vejiga y mesotelioma y con soporte mecanístico robusto; esta determinación sitúa la prevención primaria como prioridad estratégica del servicio (IARC, 2023). A la vez, los cuarteles y la logística diaria pueden constituir fuentes adicionales de exposición, como las emisiones de diésel en bahías, lo que obliga a integrar medidas fuera de la escena del incendio.

Este artículo plantea que la reducción comprobable del riesgo químico exige programas integrales que articulen: (i) controles de ingeniería como captura y filtración de gases de escape y ventilación eficaz en estaciones, (ii) medidas administrativas como zonificación de áreas, procedimientos de descontaminación y segregación de flujos limpios y contaminados, y (iii) barreras personales como uso continuo del equipo de respiración autónoma durante todas las fases incluida la remoción, alineadas con estándares operativos y de salud ocupacional vigentes. Así, el foco trasciende acciones aisladas para conformar sistemas de seguridad con objetivos, indicadores y ciclos de mejora continua.





La pregunta de investigación que orienta el manuscrito es: ¿qué conjunto de medidas de seguridad, control ambiental y salud reduce con mayor solidez la exposición al humo, sustancias químicas y contaminantes en bomberos en servicio, según la evidencia disponible desde 2019, y con qué indicadores es posible demostrar esa reducción? Esta formulación reconoce la 7 heterogeneidad de escenarios estructurales, forestales y de apoyo y busca traducir hallazgos técnicos a decisiones programáticas verificables.

Para responder, se adopta un diseño de revisión integradora con énfasis en evidencia aplicada del período 2019 a 2025. Se consultan PubMed/MEDLINE, Scopus y Web of Science en español e inglés, priorizando estudios revisados por pares que reporten resultados cuantitativos de: (a) controles de ingeniería en cuarteles con variación de carbono elemental tras instalar sistemas de extracción, (b) protección respiratoria en todas las fases con datos operativos, (c) descontaminación y mantenimiento del EPP con métricas de remoción, y (d) componentes programáticos de seguridad y salud según requisitos de NFPA 1500, 1582 y 1851.

El aporte esperado es una ruta de implementación con componentes y métricas que permita a las instituciones priorizar inversiones, actualizar protocolos y evaluar resultados de manera comparativa a lo largo del tiempo.

Marco Teórico.

La exposición ocupacional en el servicio de bomberos se entiende como un sistema de riesgos combinados que varía según el combustible, la ventilación y la fase operativa. El humo de combustión incorpora





hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP), compuestos orgánicos volátiles como el benceno, aldehídos, gases irritantes y material particulado fino y ultrafino; esta mezcla se deposita sobre superficies y equipos y puede ingresar por inhalación y por vía dérmica, incluso después de extinguido el fuego visible (IARC, 2023; Hwang et al., 2021). La evaluación más reciente de la Agencia Internacional para la Investigación sobre el Cáncer consolidó el carácter carcinógeno de esta ocupación, con evidencia suficiente en humanos para cáncer de vejiga y mesotelioma, lo que enmarca la prevención como obligación programática y no solo técnica.

Los meta-análisis recientes han cuantificado el riesgo incrementado de cáncer en bomberos comparado con la población general. Lee et al. (2023), en una revisión publicada en *Frontiers in Oncology*, encontraron que los bomberos presentan un 14% mayor riesgo de melanoma y un 24% mayor riesgo de otros cánceres de piel en comparación con la población general. El análisis de DeBono et al. (2023), realizado como parte del programa de monografías de la IARC, documentó un riesgo incrementado del 58% para mesotelioma incidente y del 16% para cáncer de vejiga.

El andamiaje conceptual se organiza por la jerarquía de controles, que prioriza eliminación y sustitución del peligro, seguida de controles de ingeniería, controles administrativos y, por último, equipo de protección personal (NIOSH, 2024). En contextos donde eliminar el peligro no es viable como en el caso del fuego, la mayor eficacia se logra actuando sobre la fuente y el medio: capturar emisiones, aislar zonas, automatizar procesos contaminantes y reducir el tiempo de permanencia. Esta prioridad orienta el diseño de programas y la asignación de recursos hacia medidas que no dependan exclusivamente del comportamiento individual.





Los bomberos están expuestos a contaminantes a través de múltiples rutas: inhalatoria, dérmica y, en menor medida, por ingestión. La protección respiratoria mediante equipo de respiración autónoma (ERA/SCBA) aborda principalmente la ruta inhalatoria, que tradicionalmente se consideraba la más relevante. Sin embargo, investigaciones recientes han demostrado que la absorción dérmica representa una vía significativa de exposición, particularmente cuando el ERA se utiliza correctamente durante la supresión activa, pero se retira prematuramente durante las fases de remoción u overhaul. Wingfors et al. (2018), en un estudio publicado en *Annals of Work Exposures and Health*, demostraron que los niveles de 1hidroxipireno en orina aumentaron significativamente tras ejercicios de entrenamiento con fuego 9 incluso cuando los bomberos utilizaron SCBA, sugiriendo que la exposición dérmica constituye una ruta predominante cuando las vías respiratorias están protegidas.

La comprensión de los mecanismos de carcinogénesis asociados a la exposición ocupacional en bomberos ha avanzado sustancialmente con la publicación de la monografía 132 de la IARC (2023). El documento establece que los bomberos están expuestos regularmente a agentes clasificados en el Grupo 1, incluyendo benceno y formaldehído, que exhiben múltiples características clave de los carcinógenos. El benceno demuestra propiedades electrofílicas, genotóxicas, inmunosupresoras y de modulación de efectos mediados por receptores, mientras que el formaldehído presenta evidencia mecanística robusta de genotoxicidad en humanos. La ausencia de umbrales seguros establecidos para estos carcinógenos genotóxicos fundamenta el principio de minimización de cualquier nivel de exposición como objetivo programático.





La temporalidad de la absorción dérmica constituye un factor crítico para el diseño de intervenciones. Estudios con modelos de piel porcina han demostrado un tiempo de latencia de aproximadamente 60 minutos antes de que la absorción percutánea alcance niveles significativos, lo que establece una ventana de oportunidad para la descontaminación temprana de la piel. Este hallazgo tiene implicaciones prácticas directas: las intervenciones de higiene personal implementadas dentro de la primera hora posterior a la exposición pueden reducir efectivamente la dosis interna de contaminantes, mientras que las intervenciones tardías tendrán eficacia limitada porque una porción sustancial de los contaminantes ya habrá atravesado la barrera cutánea.

La Asociación Nacional de Protección contra Incendios (NFPA) ha desarrollado un conjunto de estándares que proporcionan el marco normativo para la gestión de riesgos ocupacionales en el servicio de bomberos. NFPA 1500 establece los requisitos mínimos para programas de seguridad y salud, incluyendo la especificación de que los departamentos de 10 bomberos deben contener todas las emisiones de escape de vehículos a un nivel no inferior al 100% de captura efectiva. NFPA 1851 proporciona directrices para la selección, cuidado y mantenimiento del equipo de protección, incluyendo protocolos de descontaminación rutinaria y avanzada. NFPA 1582 establece requisitos para la vigilancia médica ocupacional. El policy brief conjunto de OMS y OIT (2022) sobre salud mental en el trabajo proporciona un marco metodológico transferible para la gestión sistemática de riesgos ocupacionales que incluye la identificación, evaluación, control y monitoreo de exposiciones.





Estado del Arte

La producción científica sobre exposición ocupacional y estrategias de control en bomberos ha experimentado un crecimiento acelerado desde la reclasificación de la IARC en 2022. La evidencia disponible permite caracterizar tanto los perfiles de exposición como la efectividad de diferentes intervenciones preventivas.

En biomonitoreo, los metabolitos urinarios de hidrocarburos aromáticos policíclicos (OH-HAP) se han consolidado como indicadores sensibles de exposición reciente. Hwang et al. (2021), en una revisión sistemática y meta-análisis publicado en *International Journal of Environmental Research and Public Health*, describieron incrementos posincendio de hasta 1.7 veces en metabolitos urinarios, con picos cuando la recolección ocurre entre 2 y 4 horas después del evento, y asociaciones con tareas interiores, duración de la intervención y limpieza diferida del EPP. Para compuestos orgánicos volátiles como el benceno, el S-fenilmercaptúrico (SPMA) ha mostrado detectabilidad aun a niveles bajos en simulacros y fue propuesto como marcador operativo para paneles combinados de vigilancia (Barros, Oliveira y Morais, 2023; Koslitz et al., 2023).

Fent et al. (2017), en un estudio seminal publicado en *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, caracterizaron la contaminación del EPP y la piel de bomberos durante respuestas a incendios residenciales controlados. Los niveles de HAP en el equipo de protección aumentaron después de cada respuesta, siendo mayores en bomberos asignados a ataque al fuego y operaciones de búsqueda y rescate. Este estudio estableció el precedente metodológico para evaluar la efectividad de intervenciones de descontaminación, demostrando que la





descontaminación con agua, jabón y cepillado reduce la contaminación por HAP en chaquetas de intervención en una mediana del 85%.

En controles de ingeniería dentro de estaciones, los sistemas de captura y extracción de diésel (ERS) han demostrado reducir marcadores como el carbono elemental en bahías y áreas adyacentes, proporcionando un indicador ambiental objetivo para auditoría y mantenimiento. Kim et al. (2019), en un estudio publicado en *Sustainability*, evaluaron el efecto de sistemas ERS instalados en bahías de vehículos de dos estaciones de bomberos, encontrando reducciones significativas en los niveles de carbono elemental y otros contaminantes del aire interior tras la instalación.

El EPP se reconoce también como posible fuente secundaria de exposición por su contenido intrínseco de sustancias per y polifluoroalquiladas (PFAS). El National Institute of Standards and Technology (NIST) ha conducido una serie de estudios que cuantifican la presencia de PFAS en textiles de equipo de bomberos. Maizel et al. (2023), en el primer estudio de esta serie, identificaron más de 20 tipos de PFAS en textiles de equipo nuevo, con las concentraciones más altas observadas consistentemente en las dos capas más externas de chaquetas y pantalones. Un estudio de seguimiento en 2024 demostró que el desgaste y deterioro del equipo aumenta la liberación de PFAS, planteando preocupaciones adicionales sobre la exposición a largo plazo.

En protección respiratoria, se ha consolidado la recomendación de mantener el equipo de respiración autónoma (ERA) durante todas las fases, incluida la remoción, por la persistencia de aerosoles finos y vapores en ambientes sin llama visible. Gainey et al. (2018), utilizando un modelo





murino, demostraron que la exposición a un ambiente de overhaul sin protección respiratoria resultó en expresión diferencial de 3,852 genes pulmonares, incluyendo vías asociadas con respuesta inmune, inflamación y riesgo de cáncer. Horn et al. (2020), en un estudio de intervención, evaluaron la efectividad de múltiples prácticas de reducción de exposición, demostrando reducciones significativas en los metabolitos urinarios de HAP con el uso de SCBA por ingenieros y descontaminación de superficie del EPP antes de quitárselo.

La variabilidad de exposición según asignación de tareas ha sido cuantificada con precisión en estudios recientes. Fent et al. (2020), en *Journal of Exposure Science and Environmental Epidemiology*, documentaron que los bomberos asignados a ataque y búsqueda presentaron incrementos de 2.3 a 5.6 veces en metabolitos urinarios de HAP, mientras que las posiciones de comando mostraron exposiciones tres órdenes de magnitud inferiores. Adicionalmente, el ataque transicional demostró reducciones del 20-50% en la absorción de HAP comparado con el ataque interior directo, estableciendo la táctica de supresión como variable modificable en la ecuación de riesgo químico. Para bomberos forestales, Navarro et al. (2021) encontraron que el 19% de las exposiciones a material particulado excedieron los límites recomendados, con riesgos acumulativos significativos debido a jornadas prolongadas sin protección respiratoria.

El hilo conductor emergente en la literatura es que la combinación de medidas supera a intervenciones aisladas. Paquetes que integran ERS en estaciones, zonificación arquitectónica, ERA continuo, descontaminación en campo y lavandería verificada, junto con vigilancia clínica que incorpore





biomarcadores, muestran el mayor potencial de reducción de exposición. Persisten brechas que orientan investigación aplicada: la estandarización internacional de protocolos de limpieza para compuestos semivolátiles, series longitudinales que conecten paquetes de control con trayectorias de biomarcadores y desenlaces clínicos, y evaluaciones de costo-efectividad para priorizar inversiones.

Desarrollo.

Controles de ingeniería en estaciones de bomberos

Sistemas de extracción de emisiones diésel

Los sistemas de extracción de emisiones (ERS) representan el control de ingeniería más ampliamente implementado y estudiado en estaciones de bomberos. Estos sistemas capturan las emisiones de diésel directamente desde el tubo de escape de los vehículos y las conducen fuera del edificio, eliminando virtualmente la exposición de los trabajadores presentes en la bahía de aparatos. La captura en fuente se considera más efectiva que la filtración ambiental porque previene que los contaminantes se dispersen por el espacio de trabajo y alcancen la zona de respiración de los bomberos.

Kim et al. (2019) evaluaron cuantitativamente el efecto de la instalación de sistemas ERS en dos estaciones de bomberos coreanas. Los investigadores midieron las concentraciones de carbono elemental como marcador sustituto de partículas de escape diésel, monóxido de carbono, dióxido de carbono, compuestos orgánicos volátiles totales y formaldehído antes y después de la instalación del sistema. Los resultados demostraron reducciones significativas en los niveles de la mayoría de los contaminantes tras la activación del ERS. Específicamente, los niveles de carbono





elemental en las bahías de vehículos disminuyeron marcadamente, y se observó también reducción en áreas adyacentes como oficinas, salas de ducha y salas de espera, demostrando que los sistemas ERS previenen la migración de contaminantes a través de la estación.

NFPA 1500 especifica que los departamentos de bomberos deben contener todas las emisiones de escape de vehículos a un nivel no inferior al 100% de captura efectiva. Esta especificación establece que la apertura de puertas de bahía antes de arrancar los aparatos no constituye un sustituto adecuado para un sistema de extracción dedicado. Los tipos principales de sistemas incluyen: sistemas de captura directa en fuente con mangueras conectadas al tubo de escape que se desconectan automáticamente cuando el vehículo sale, sistemas de cortina de aire que crean una barrera en las puertas de la bahía, y sistemas de filtración ambiental montados en el techo que procesan el aire de toda la bahía.

Las evaluaciones de NIOSH en múltiples estaciones de bomberos han proporcionado datos de referencia sobre las concentraciones típicas de contaminantes. En un estudio de 2017, Li y Burr encontraron que más del 95% de las partículas de escape diésel tienen menos de 1 micrómetro de tamaño, lo que las hace respirables y capaces de penetrar profundamente en los pulmones. Los niveles de carbono fueron consistentemente más altos en las bahías de vehículos comparados con las áreas de habitación, aunque todas las mediciones en áreas de vida se mantuvieron por debajo de los límites de referencia recomendados. Esta distribución espacial confirma la efectividad de la separación física entre áreas de trabajo y áreas de vida, pero también subraya la necesidad de captura en fuente para





proteger adecuadamente a los bomberos durante las operaciones en la bahía.

Diseño arquitectónico y zonificación

La segregación física entre áreas contaminadas y áreas limpias constituye un control de ingeniería fundamental que complementa los sistemas de extracción. Las estaciones de bomberos modernas incorporan principios de diseño que minimizan la migración de contaminantes, incluyendo presurización positiva de las áreas de vida respecto a las bahías de aparatos, vestidores de transición entre zonas, y flujos de aire direccionados desde áreas limpias hacia áreas contaminadas.

La zonificación típica distingue tres categorías: zona caliente que incluye bahías de aparatos donde se estacionan vehículos y se almacena equipo contaminado, zona templada que comprende áreas de transición como vestidores y espacios de descontaminación, y zona fría que incluye oficinas, dormitorios, cocinas y áreas de recreación. El principio operativo es que los contaminantes no deben migrar de zonas calientes a zonas frías, y que el personal debe seguir procedimientos de descontaminación al transitar entre zonas.

Las evaluaciones post-ocupación de estaciones diseñadas con estos principios muestran niveles significativamente menores de contaminantes en las áreas de vida comparadas con estaciones de diseño tradicional donde las bahías de aparatos tienen conexión directa con los espacios habitables. Sin embargo, incluso en estaciones bien diseñadas, la efectividad de la zonificación depende del cumplimiento de los protocolos





operativos por parte del personal, lo que subraya la interdependencia entre controles de ingeniería y controles administrativos.

Controles administrativos y procedimientos operativos

Uso continuo del equipo de respiración autónoma

La recomendación de mantener el equipo de respiración autónoma (ERA/SCBA) durante todas las fases de la respuesta a incendios, incluida la fase de remoción u overhaul, representa un cambio paradigmático respecto a las prácticas tradicionales. Históricamente, muchos departamentos de bomberos permitían o incluso alentaban el retiro del ERA una vez que las llamas visibles se habían extinguido, basándose en la percepción de que la atmósfera ya no representaba un peligro significativo. La evidencia científica actual contradice esta percepción.

Gainey et al. (2018) proporcionaron evidencia experimental directa del riesgo asociado con la exposición sin protección durante el overhaul. Utilizando un modelo murino, los investigadores expusieron ratones al ambiente de overhaul de un incendio estructural controlado mientras monitoreaban los niveles de gases con instrumentos portátiles. Aunque las concentraciones de monóxido de carbono, dióxido de carbono, cianuro de hidrógeno, sulfuro de hidrógeno y oxígeno se mantuvieron dentro de los límites de techo recomendados por NIOSH, la exposición resultó en expresión diferencial de 3,852 genes pulmonares. Las vías afectadas incluyeron respuesta inmune innata, modulación de efectos mediados por receptores, e inflamación, todas ellas asociadas mecánicamente con el desarrollo de enfermedades pulmonares crónicas y cáncer.





Fent et al. (2020) examinaron la absorción de HAP y COV por asignación de trabajo y táctica de ataque durante incendios residenciales controlados. Los bomberos asignados a ataque al fuego y operaciones de búsqueda mostraron mayores concentraciones de biomarcadores que los asignados a otras posiciones, a pesar de que todos utilizaron SCBA durante las operaciones interiores. Este hallazgo sugiere que, incluso con protección respiratoria adecuada durante el ataque, la exposición ocurre a través de rutas alternativas, principalmente dérmicas, y posiblemente también durante momentos transitorios como el cambio de cilindros o el retiro del ERA al salir de la estructura.

Las guías operativas actuales de organizaciones como la IAFF y el Departamento de Seguridad Nacional de Estados Unidos recomiendan mantener el ERA hasta que se complete la ventilación del espacio y se realice una verificación atmosférica con instrumentos calibrados. La verificación debe confirmar que los niveles de contaminantes se encuentran por debajo de los límites de exposición ocupacional antes de autorizar el retiro de la protección respiratoria. Adicionalmente, se recomienda que los bomberos se posicionen corriente arriba del humo residual cuando sea posible y que minimicen el tiempo de permanencia en ambientes potencialmente contaminados.

Descontaminación en el lugar del incendio

La descontaminación preliminar de reducción de exposición o descontaminación gruesa en el lugar del incendio ha ganado reconocimiento como intervención crítica para reducir la transferencia de contaminantes y la exposición dérmica continuada. El principio subyacente es que la remoción temprana de contaminantes de la superficie





del EPP reduce tanto la exposición dérmica directa como la desgasificación de compuestos volátiles que el bombero podría inhalar durante el viaje de regreso a la estación.

Fent et al. (2017) evaluaron tres métodos de descontaminación en campo: descontaminación húmeda con agua y jabón, descontaminación con cepillo seco, y descontaminación basada en aire utilizando un soplador eléctrico modificado. Los resultados demostraron claramente la superioridad del método húmedo: la descontaminación con agua, jabón y cepillado removió una mediana del 85% de la contaminación por HAP presente en las chaquetas de intervención. En contraste, el cepillado en seco solo removió el 24% de los contaminantes, mientras que el método basado en aire resultó esencialmente inefectivo, observándose paradójicamente un ligero incremento del 0.5% en los niveles de HAP, posiblemente debido a la redistribución de partículas sobre la superficie del equipo.

Calvillo et al. (2019) investigaron específicamente la efectividad del método de descontaminación solo con agua, dado que este método requiere menos tiempo y suministros que la descontaminación con jabón. Los resultados fueron decepcionantes: no solo el agua sola no fue efectiva, sino que se observó un incremento global del 42% en la contaminación por HAP después del proceso de descontaminación. Los investigadores sugirieron que este incremento inesperado podría deberse a sitios de muestreo dispares antes y después de la descontaminación, pero el hallazgo práctico es claro: el uso de jabón o detergente es esencial para la remoción efectiva de contaminantes lipofílicos como los HAP.





Los procedimientos de descontaminación en campo actualmente recomendados incluyen: posicionamiento del bombero en una zona designada, preferiblemente sobre una superficie impermeable que capture el agua de escorrentía; enjuague inicial con agua para remover partículas sueltas y ceniza; aplicación de jabón líquido o detergente a las superficies externas del EPP; cepillado con un cepillo de cerdas suaves, prestando atención particular a áreas de alta contaminación como mangas, frente de la chaqueta y rodillas del pantalón; enjuague final abundante; y embolsado del EPP húmedo en bolsas herméticas para transporte a la estación donde recibirá limpieza avanzada.

Gestión del equipo de protección personal

Protocolos de limpieza según NFPA 1851

NFPA 1851 establece los requisitos para la selección, cuidado y mantenimiento de los conjuntos de protección para combate de incendios estructurales. El estándar distingue entre limpieza rutinaria que puede realizarse sin retirar los elementos del servicio y limpieza avanzada que requiere lavado con agentes de limpieza o limpieza especializada. La limpieza rutinaria incluye la descontaminación en campo descrita anteriormente, mientras que la limpieza avanzada se refiere al lavado en máquina con detergentes específicos para textiles de intervención.

Hossain et al. (2023) evaluaron el rendimiento de diferentes productos de limpieza, incluyendo detergentes comerciales y productos a base de carbón activado, para remover HAP de la capa externa del equipo de intervención. Los investigadores contaminaron muestras de tela con una mezcla estándar de 16 compuestos HAP y las sometieron a un





procedimiento de lavado a escala de banco que simulaba el proceso de lavandería de NFPA 1851. Los resultados revelaron que la eficacia de remoción de HAP de alto peso molecular fue consistentemente menor que para HAP de bajo peso molecular, independientemente del tipo o concentración de detergente. Este hallazgo tiene implicaciones importantes porque los HAP de alto peso molecular, como el benzo(a)pireno, son los que presentan mayor potencial carcinógeno.

Los desafíos adicionales en la limpieza del EPP incluyen la remoción de compuestos semivolátiles (SVOC) y la prevención de contaminación cruzada. Banks et al. (2021) documentaron que los SVOC presentan dificultades particulares debido a su tendencia a reabsorberse en los textiles durante el proceso de secado. Además, si las lavanderías no implementan segregación de flujos, parámetros validados de lavado y mantenimiento periódico de equipos, existe riesgo de que el EPP limpio se recontamine a partir de residuos acumulados en las máquinas o del contacto con equipo contaminado durante el manejo.

Gestión de PFAS en el equipo de protección

Las sustancias per y polifluoroalquiladas (PFAS) presentes en los textiles del EPP representan una fuente de exposición ocupacional que no está relacionada con los productos de combustión sino con la composición intrínseca del equipo. Los PFAS se utilizan en el EPP de bomberos por sus propiedades repelentes al agua y aceite, y por su capacidad de resistir altas temperaturas sin degradarse. Sin embargo, estas mismas propiedades que los hacen útiles también los hacen persistentes en el medio ambiente y en el cuerpo humano, ganándose el apodo de químicos eternos.





Maizel et al. (2023), en el primer estudio del NIST sobre PFAS en equipo de bomberos, analizaron 20 muestras de textiles nuevos utilizados en cada una de las tres capas del equipo de intervención: capa externa, barrera de humedad y forro térmico. Los resultados mostraron que las concentraciones de PFAS varían ampliamente entre fabricantes y capas, con las concentraciones más altas observadas consistentemente en las dos capas más externas. Los investigadores identificaron más de 20 tipos diferentes de PFAS en los textiles analizados.

Un estudio de seguimiento del NIST en 2024 evaluó si el desgaste del equipo aumenta la liberación de PFAS. Los investigadores sometieron los mismos textiles a cuatro tipos de estrés: abrasión, calor elevado, lavado y exposición a la intemperie. Los resultados demostraron que el desgaste tiende a aumentar la cantidad de PFAS que los textiles liberan, lo que sugiere que los bomberos pueden estar expuestos a mayores niveles de PFAS a medida que su equipo envejece. Este hallazgo tiene implicaciones para los ciclos de reemplazo del EPP y para los protocolos de manipulación del equipo viejo durante su disposición final.

Las recomendaciones actuales para la gestión de PFAS en el EPP incluyen: inventariar el equipo existente y sus especificaciones de fabricante; minimizar el contacto dérmico directo con el equipo, particularmente cuando está mojado o húmedo; utilizar guantes de nitrilo cuando se manipule equipo fuera del contexto de emergencia; almacenar el equipo en áreas separadas de los espacios de vida; y considerar la transición a alternativas con menor contenido de PFAS cuando estén disponibles y cumplan con los requisitos de rendimiento.





Vigilancia médica y biomonitoreo

El biomonitoreo mediante la medición de metabolitos en fluidos biológicos proporciona una evaluación integrada de la exposición que captura todas las rutas de entrada (inhalatoria, dérmica, ingestión) y tiene en cuenta las diferencias individuales en absorción y metabolismo. Para los HAP, los metabolitos urinarios hidroxilados (OH-HAP) se han establecido como biomarcadores de exposición de corto plazo, con vidas medias de eliminación que van desde unas pocas horas hasta aproximadamente un día dependiendo del compuesto específico.

El 1-hidroxi pireno (1-OH-PYR) es el metabolito OH-HAP más comúnmente utilizado en estudios de exposición ocupacional porque el pireno es un componente ubicuo de las mezclas de HAP y su metabolito urinario es fácilmente detectable con métodos analíticos estándar. Sin embargo, el pireno no es carcinógeno, por lo que el 1-OH-PYR sirve como indicador de exposición a la mezcla general de HAP pero no específicamente a los compuestos más peligrosos como el benzo(a)pireno. Barros, Oliveira y Morais (2023), en una revisión comprehensiva publicada en *Journal of Toxicology and Environmental Health Part B*, recomendaron el uso de paneles de múltiples metabolitos OH-HAP en lugar de depender exclusivamente del 1-OH-PYR para obtener una caracterización más completa de la exposición.

Taeger et al. (2023) midieron la exposición a HAP mediante biomonitoreo en bomberos durante operaciones de incendio en Alemania. Los investigadores encontraron que los niveles de 1-OH-PYR en orina aumentaron significativamente después de las actividades de extinción, con una proporción sustancial de participantes excediendo los valores de





referencia para la población no ocupacionalmente expuesta. Estos hallazgos confirman que incluso con uso de EPP, la absorción de HAP es medible y puede exceder los niveles considerados normales para la población general.

NFPA 1582 establece los requisitos para programas médicos ocupacionales comprensivos en departamentos de bomberos, incluyendo evaluaciones médicas previas al empleo, exámenes periódicos anuales, evaluaciones de aptitud para el servicio, y vigilancia de enfermedades ocupacionales. El estándar reconoce que los bomberos enfrentan exposiciones ocupacionales únicas que requieren vigilancia específica más allá de los exámenes médicos generales. Los componentes recomendados incluyen historia ocupacional detallada, cuestionarios de síntomas, exámenes físicos con atención particular a piel, sistema respiratorio y sistema cardiovascular, pruebas de función pulmonar de referencia y periódicas, y evaluación de capacidad de trabajo con ejercicio.

Intervenciones combinadas y paquetes de control

La evidencia más robusta sobre la reducción de exposiciones en bomberos proviene de estudios que evalúan paquetes de intervenciones combinadas en lugar de medidas aisladas. Horn et al. (2020), en un estudio de intervención publicado en Journal of Occupational and Environmental Medicine, evaluaron la efectividad de múltiples prácticas de reducción de exposición implementadas por el Departamento de Bomberos de Tucson.

Las intervenciones evaluadas incluyeron: uso de SCBA por ingenieros y personal de investigación de causas que tradicionalmente no usaban protección respiratoria durante las operaciones de incendio;





descontaminación de superficie del EPP y SCBA antes del retiro principalmente para equipos de entrada; descontaminación adicional de la piel; y segregación del equipo contaminado para transporte y limpieza adicional al regresar a la estación.

Los resultados del estudio pre y post-intervención demostraron reducciones significativas en los metabolitos urinarios de HAP. Específicamente, los ingenieros que adoptaron el uso de SCBA mostraron las reducciones más pronunciadas en biomarcadores, consistente con la hipótesis de que su exposición previa era predominantemente inhalatoria. Los equipos de entrada que implementaron el protocolo de descontaminación también mostraron reducciones significativas, aunque de menor magnitud, consistente con la hipótesis de que su exposición tiene un componente dérmico importante que persiste incluso con protección respiratoria.

Notablemente, el uso de saunas infrarrojas post-exposición, una intervención promovida por algunos departamentos como estrategia de desintoxicación, no demostró reducciones significativas en los metabolitos urinarios de HAP. Este hallazgo sugiere que las intervenciones deben enfocarse en prevenir la exposición inicial usando SCBA y descontaminando tempranamente en lugar de intentar eliminar los contaminantes del cuerpo después de la absorción.

La traducción de la evidencia científica a programas operativos efectivos requiere consideración de múltiples factores más allá de la eficacia demostrada en estudios controlados. Estos factores incluyen: factibilidad operativa en condiciones reales de emergencia, costos de implementación y sostenimiento, aceptación por parte del personal, disponibilidad de





equipamiento y suministros, y capacidad de supervisión y cumplimiento. Los elementos de un programa comprehensivo de reducción de exposición incluyen políticas escritas, equipamiento necesario, entrenamiento inicial y continuo, supervisión y cumplimiento, y evaluación y mejora continua.

Exposición a compuestos orgánicos volátiles: benceno, formaldehído y acroleína

Más allá de los hidrocarburos aromáticos policíclicos, los bomberos están expuestos a un conjunto de compuestos orgánicos volátiles (COV) que representan riesgos carcinogénicos y toxicológicos independientes. El benceno, clasificado como carcinógeno del Grupo 1 por la IARC con evidencia suficiente de leucemia en humanos, constituye el COV predominante en el humo de incendios estructurales. El formaldehído, también clasificado en el Grupo 1 con evidencia de carcinoma nasofaríngeo, y la acroleína, un irritante respiratorio severo clasificado en el Grupo 2A, completan el perfil de COV prioritarios para la vigilancia ocupacional.

Fent et al. (2022), en un estudio publicado en *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, cuantificaron los metabolitos urinarios de COV en bomberos después de respuestas a incendios residenciales controlados y entrenamientos con fuego vivo. Los investigadores encontraron que las concentraciones de metabolitos de benceno, estireno y acroleína aumentaron significativamente desde antes del incendio hasta tres horas después de la exposición, incluso cuando los bomberos utilizaron equipo de respiración autónoma durante las operaciones interiores. Este hallazgo confirma que la absorción dérmica representa una





ruta significativa de exposición para los COV, complementando los hallazgos previos sobre HAP.

La monografía 132 de la IARC (2023) documenta que los bomberos están expuestos regularmente a agentes clasificados en el Grupo 1, incluyendo benceno y formaldehído, que exhiben múltiples características clave de los carcinógenos. El benceno es electrofílico, genotóxico, altera la proliferación celular, es inmunosupresor y modula efectos mediados por receptores. La evidencia mecanística robusta para la genotoxicidad del benceno en humanos fundamenta la necesidad de minimizar cualquier nivel de exposición, dado que no se ha establecido un umbral seguro para carcinógenos genotóxicos.

La variabilidad estacional y espacial de los COV dentro de las estaciones de bomberos ha sido documentada recientemente. Un estudio polaco publicado en *Building Research and Information* en 2024 encontró que las concentraciones más altas de COV totales se registraron en las salas de descanso, mientras que las mayores concentraciones de benceno, tolueno, etilbenceno y xileno (BTEX) se detectaron en las bahías de vehículos, y el formaldehído alcanzó sus niveles máximos en los puntos de alarma. Esta distribución espacial tiene implicaciones para el diseño de sistemas de ventilación y para la zonificación de actividades dentro de las estaciones.

Absorción dérmica: mecanismos y evidencia en bomberos

La comprensión de la absorción dérmica como ruta significativa de exposición ocupacional en bomberos ha evolucionado sustancialmente en los últimos años. Tradicionalmente, la protección respiratoria se consideraba la intervención principal porque la inhalación se asumía como





la ruta predominante de entrada de contaminantes. Sin embargo, estudios de biomonitorio han demostrado consistentemente que los bomberos absorben cantidades medibles de HAP y COV incluso cuando utilizan equipo de respiración autónoma durante toda la respuesta.

Fent et al. (2014), en un estudio seminal publicado en *Annals of Occupational Hygiene*, demostraron que los HAP probablemente ingresaron al organismo de los bomberos a través de la piel, con el cuello siendo un sitio primario de exposición y absorción debido al menor nivel de protección dérmica proporcionado por las capuchas tradicionales. Los investigadores aseguraron que cualquier incremento en los niveles sistémicos de HAP después del incendio fuera resultado de la exposición dérmica y no inhalatoria, manteniendo a los bomberos con el ERA colocado hasta que estuvieron a más de 30 metros a favor del viento de la estructura.

Una revisión publicada en *International Journal of Environmental Research and Public Health* en 2022 sintetizó la evidencia sobre exposición dérmica a HAP durante actividades de extinción de incendios. Los autores documentaron que la contaminación de la piel de los bomberos con HAP se concentra principalmente en el cuello (2.23-62.50 ng/cm²), muñecas (0.37-8.30 ng/cm²), rostro (2.50-4.82 ng/cm²) y manos (1.59-4.69 ng/cm²). Las concentraciones de carcinógenos probables y posibles, incluyendo isómeros del benzo(a)pireno, alcanzaron rangos de 0.82-33.69 ng/cm² en la piel de los bomberos, lo que subraya la relevancia de la protección dérmica como complemento de la protección respiratoria.

Probert et al. (2024), utilizando un modelo de piel porcina in vitro, investigaron la absorción percutánea de HAP bajo condiciones simuladas de extinción de incendios con piel sudorosa y temperaturas elevadas. Los





resultados demostraron que el peso molecular y la solubilidad influyen en la captación dérmica, y se observó un tiempo de latencia de aproximadamente 60 minutos antes de que la absorción alcanzara niveles significativos. Este hallazgo respalda la importancia de las prácticas de limpieza de la piel dentro de la primera hora posterior a la exposición para reducir la dosis interna de contaminantes.

Variabilidad de exposición según asignación de tareas y táctica de ataque

La evidencia científica demuestra que la exposición a contaminantes varía significativamente según la asignación de tareas en el lugar del incendio y la táctica de supresión empleada. Esta variabilidad tiene implicaciones directas para la priorización de intervenciones preventivas y para la personalización de protocolos según el perfil de riesgo de cada posición operativa.

Fent et al. (2020), en un estudio publicado en *Journal of Exposure Science and Environmental Epidemiology*, examinaron la absorción de HAP y COV por asignación de trabajo y táctica de ataque durante incendios residenciales controlados. Los bomberos asignados a ataque al fuego y operaciones de búsqueda mostraron los incrementos más pronunciados en metabolitos urinarios: aumentos de 2.3, 5.6, 3.9 y 1.4 veces en metabolitos de pireno, fenantreno, naftaleno y fluoreno, respectivamente. Las concentraciones de benceno en aliento exhalado aumentaron 2 veces para los bomberos de ataque y búsqueda y 1.4 veces para los de ventilación exterior.





Un hallazgo particularmente relevante de este estudio fue que el ataque transicional, que consiste en aplicar agua al fuego desde el exterior antes de la entrada, resultó en 50% menos absorción de pireno, 36% menos de fenantreno y 20% menos de fluoreno comparado con el ataque interior directo. Esta reducción de exposición asociada al ataque transicional proporciona fundamento para considerar la táctica de supresión como una variable modificable en la ecuación de riesgo químico, complementando las decisiones tácticas tradicionalmente basadas en la protección de ocupantes y la eficiencia de supresión.

Los bomberos asignados a posiciones de comando de incidente y operación de bombas mostraron las exposiciones más bajas, con concentraciones de HAP en aire menores a $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y benceno menor a 0.01 ppm. En contraste, las posiciones de ataque y búsqueda presentaron medianas de HAP en aire de 17,800-23,800 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y benceno de 37.9-40.3 ppm. Esta gradiente de exposición de tres órdenes de magnitud justifica políticas diferenciadas de descontaminación y vigilancia según la posición operativa.

Consideraciones específicas para incendios forestales y de vegetación

Los bomberos forestales enfrentan un perfil de exposición distintivo que difiere de los bomberos estructurales en varios aspectos críticos. A diferencia de sus contrapartes estructurales, los bomberos forestales típicamente no utilizan equipo de respiración autónoma debido a las limitaciones prácticas de operar en terreno extenso durante turnos prolongados. Esta ausencia de protección respiratoria, combinada con





jornadas de trabajo que pueden extenderse por 16 horas o más durante múltiples días consecutivos, resulta en exposiciones acumulativas que pueden superar las de incendios estructurales individuales.

Navarro et al. (2021), en un estudio publicado en *Environmental Science and Technology*, caracterizaron la exposición de bomberos forestales a material particulado y compuestos orgánicos volátiles durante diferentes tareas de supresión. Los resultados indicaron que el 19% de las muestras de material particulado fino excedieron el límite de exposición ocupacional recomendado por el National Wildfire Coordinating Group de 0.7 mg/m^3 . Los bomberos que realizaban supresión directa presentaron exposiciones estadísticamente superiores a quienes realizaban tareas de espera u otras actividades, con diferencias medias de 0.82 mg/m^3 para equipos Tipo 1 versus Tipo 2.

El humo de incendios forestales contiene una mezcla compleja que incluye monóxido de carbono, benceno, formaldehído, material particulado, acroleína e hidrocarburos aromáticos policíclicos. Navarro y Domitrovich, en publicaciones del CDC-NIOSH de 2024, documentaron que aunque las exposiciones medidas en incendios forestales frecuentemente son menores que en incendios estructurales, la duración prolongada de la exposición durante días y semanas puede resultar en dosis acumulativas comparables o superiores. El riesgo estimado de mortalidad por cáncer pulmonar para bomberos forestales oscila entre 8% y 43% incremento según diferentes escenarios de exposición y duración de carrera.





Higiene personal y descontaminación de la piel

La descontaminación de la piel posterior a la exposición constituye una intervención complementaria a la descontaminación del EPP que ha recibido atención creciente en la literatura. El fundamento científico radica en que los contaminantes depositados sobre la piel continúan absorbiéndose mientras permanecen en contacto con la superficie cutánea, por lo que la remoción temprana puede reducir la dosis interna total.

Keir et al. (2023), en un estudio publicado en *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, evaluaron la efectividad de intervenciones de limpieza dérmica para reducir las exposiciones de bomberos a HAP y genotoxinas. Aunque las estrategias de descontaminación con agua y agua-jabón fueron capaces de remover cantidades significativas de HAP de la superficie de la piel, los investigadores no observaron una reducción significativa en la dosis interna medida como metabolitos urinarios. Este hallazgo sugiere que una porción sustancial de la absorción dérmica puede ocurrir durante las actividades de supresión del incendio y no puede revertirse mediante la descontaminación posterior.

Las implicaciones prácticas de este hallazgo son significativas: aunque la descontaminación de la piel sigue siendo recomendable para minimizar la absorción continuada después de la exposición inicial, la protección química adicional durante las actividades de supresión puede ser necesaria para mitigar efectivamente la absorción dérmica. Probert et al. (2024), en un estudio complementario, evaluaron si los ingredientes de las soluciones de toallitas descontaminantes podrían aumentar la absorción dérmica mediante el fenómeno de lavado hacia adentro, concluyendo que las





soluciones evaluadas no incrementaron la penetración cutánea, respaldando su uso en prácticas de descontaminación.

Capas de base y ropa interior como barrera adicional

El uso de ropa de base de manga larga bajo el equipo de protección personal ha emergido como una estrategia potencial para proporcionar una barrera adicional contra la absorción dérmica de contaminantes. La hipótesis subyacente es que una capa textil adicional entre la piel y el interior del equipo de intervención podría reducir el contacto directo con los contaminantes que penetran el EPP.

Mayer et al. (2023), en un estudio publicado en *International Journal of Environmental Research and Public Health*, evaluaron la exposición a COV y naftaleno para bomberos usando diferentes configuraciones de EPP, incluyendo variaciones en las capas de base. Los resultados mostraron que la configuración de ropa de base de una pieza de manga larga (OL) proporcionó mayor protección que las configuraciones de manga corta para algunos contaminantes. Sin embargo, las diferencias entre configuraciones fueron modestas para varios metabolitos, incluyendo benceno y estireno, lo que sugiere que el beneficio de las capas de base adicionales puede variar según el contaminante específico.

Un hallazgo notable de este estudio fue que desabrochar rápidamente la chaqueta del equipo de intervención después de salir de la escena del incendio puede ser una medida fácil y efectiva para reducir la concentración global de COV atrapados contra la piel. Esta práctica simple permite la ventilación de los vapores acumulados bajo el equipo,





reduciendo la exposición dérmica continuada durante el período posterior a la supresión activa.

Registro de exposiciones y sistemas de trazabilidad

La documentación sistemática de las exposiciones ocupacionales constituye un componente esencial de los programas de vigilancia de la salud en el servicio de bomberos. El registro de exposiciones permite establecer historiales individuales que facilitan la detección temprana de patrones de riesgo, fundamentan reclamaciones de enfermedades ocupacionales, y proporcionan datos para la evaluación de la efectividad de las intervenciones preventivas a nivel institucional.

El National Firefighter Registry (NFR) de Estados Unidos, administrado por NIOSH, representa un esfuerzo sistemático para vincular las exposiciones ocupacionales con los desenlaces de salud a largo plazo. Según información publicada por CDC-NIOSH en 2024, aproximadamente 1,800 bomberos forestales se han inscrito en el registro, representando cerca del 10% de la población total inscrita. El NFR está explorando opciones para vincular datos de exposición de sistemas existentes de seguimiento, lo que permitiría análisis más robustos de las relaciones dosis-respuesta.

A nivel de departamento individual, los sistemas de registro deben documentar como mínimo: fecha y tipo de incidente, duración de la exposición, posición operativa desempeñada, uso de equipo de protección respiratoria y personal, procedimientos de descontaminación realizados, y cualquier síntoma agudo reportado. La integración de estos datos con los resultados de los exámenes médicos periódicos permite la construcción progresiva de perfiles de riesgo individuales que pueden informar





decisiones sobre asignación de tareas, frecuencia de vigilancia médica, y elegibilidad para programas de detección temprana de cáncer.

Discusión

La revisión sistemática de la literatura científica disponible revela un cuerpo de evidencia convergente que fundamenta la implementación de programas comprensivos de prevención de riesgos químicos en el servicio de bomberos. La reclasificación de la exposición ocupacional como bombero al Grupo 1 de carcinógenos por la IARC en 2022 representa un punto de inflexión que sitúa la prevención primaria como imperativo ético y legal, no meramente como recomendación técnica. Esta determinación se fundamenta en evidencia suficiente de incremento de riesgo para cáncer de vejiga y mesotelioma, estableciendo un vínculo causal entre la ocupación y desenlaces oncológicos específicos.

El marco conceptual de la jerarquía de controles proporciona una arquitectura lógica para organizar las intervenciones. Los controles de ingeniería, particularmente los sistemas de extracción de emisiones diésel en estaciones, representan la intervención más efectiva para reducir las exposiciones dentro del cuartel porque no dependen del comportamiento individual y funcionan automáticamente. La evidencia de Kim et al. (2019) demuestra que estos sistemas reducen significativamente el carbono elemental en las bahías de aparatos y previenen la migración de contaminantes hacia las áreas de vida. Sin embargo, la instalación de sistemas ERS representa una inversión de capital significativa que puede ser prohibitiva para departamentos de bomberos pequeños o con recursos limitados.





El uso continuo del ERA durante todas las fases de la respuesta, incluida la remoción, emerge de la literatura como una intervención de alto impacto que está completamente bajo el control del departamento de bomberos sin requerir inversiones de capital significativas. La evidencia de Gainey et al. (2018) sobre la expresión génica alterada en exposiciones de overhaul y de Horn et al. (2020) sobre la reducción de biomarcadores con la política de uso de SCBA por ingenieros fundamenta sólidamente esta recomendación. Sin embargo, la implementación efectiva requiere cambio cultural, entrenamiento y supervisión, porque las prácticas históricas de retirar el ERA una vez extinguidas las llamas visibles están profundamente arraigadas en muchos servicios de bomberos.

La descontaminación del EPP con agua, jabón y cepillado representa una intervención de bajo costo y alta efectividad (85% de remoción de HAP según Fent et al., 2017) que puede implementarse inmediatamente en cualquier departamento de bomberos con inversión mínima. El contraste con la ineffectividad de la descontaminación solo con agua documentada por Calvillo et al. (2019) subraya la importancia de utilizar agentes surfactantes para la remoción de contaminantes lipofílicos como los HAP.

La presencia de PFAS en los textiles del EPP introduce una complejidad adicional que no se resuelve con las estrategias tradicionales de descontaminación. Los estudios del NIST (Maizel et al., 2023, 2024) documentan la presencia de múltiples tipos de PFAS en el equipo nuevo y la mayor liberación de estos compuestos conforme el equipo se desgasta. Esta evidencia fundamenta consideraciones de política que exceden el nivel del departamento individual, incluyendo especificaciones de compra, regulación de fabricantes y desarrollo de alternativas tecnológicas.





El biomonitoreo mediante metabolitos urinarios proporciona una herramienta valiosa tanto para la investigación como para la evaluación de programas. La capacidad de medir la absorción real de contaminantes, integrando todas las rutas de exposición, permite la evaluación objetiva de la efectividad de las intervenciones implementadas. Los estudios de intervención como el de Horn et al. (2020) demuestran que las reducciones en biomarcadores son medibles y correlacionan con las prácticas preventivas implementadas.

Un hallazgo emergente que merece consideración especial es la limitada efectividad de la descontaminación de la piel para reducir la dosis interna de contaminantes una vez que la exposición ha ocurrido. Keir et al. (2023) demostraron que, aunque las estrategias de limpieza dérmica con agua y jabón remueven cantidades significativas de HAP de la superficie cutánea, no logran reducir significativamente los niveles de metabolitos urinarios. Esta evidencia sugiere que una porción sustancial de la absorción dérmica ocurre durante las actividades de supresión y no puede revertirse mediante intervenciones posteriores, lo que refuerza la importancia de la protección durante la exposición activa más que de la remediación posterior.

La documentación sistemática de exposiciones representa un componente frecuentemente subestimado de los programas de prevención. El establecimiento de registros individuales que documenten tipo de incidente, duración, posición operativa y procedimientos de descontaminación permite construir perfiles de riesgo acumulativo que pueden informar decisiones sobre vigilancia médica diferenciada y elegibilidad para programas de detección temprana de cáncer. La





experiencia del National Firefighter Registry en Estados Unidos demuestra la viabilidad de sistemas de trazabilidad que vinculen exposiciones con desenlaces de salud a largo plazo.

La transferibilidad de los hallazgos al contexto ecuatoriano requiere consideración de las particularidades locales. El Benemérito Cuerpo de Bomberos opera bajo marcos normativos y recursos diferentes a los departamentos de bomberos estadounidenses o europeos de donde proviene la mayoría de la evidencia. Sin embargo, los principios fundamentales de la jerarquía de controles y las intervenciones específicas de bajo costo como la descontaminación del EPP y el uso continuo del ERA son aplicables universalmente porque se fundamentan en la química de los contaminantes y la fisiología de la exposición humana, no en factores culturales o geográficos específicos.

Las limitaciones de la evidencia disponible incluyen: la predominancia de estudios en departamentos de bomberos de países de altos ingresos; la escasez de ensayos controlados aleatorizados que evalúen intervenciones; la heterogeneidad de métodos de medición que dificulta las comparaciones entre estudios; y la falta de seguimiento a largo plazo que vincule las exposiciones medidas con desenlaces de salud clínicos como incidencia de cáncer o mortalidad. Futuras investigaciones deberían priorizar diseños longitudinales, estandarización de métodos de biomonitoreo, y estudios de implementación que evalúen la efectividad de las intervenciones bajo condiciones operativas reales en contextos diversos.

Conclusiones

La presente revisión bibliográfica permite establecer, con base en la evidencia científica disponible del período 2019-2025, que la prevención





efectiva de riesgos ocupacionales asociados a la exposición al humo, sustancias químicas y contaminantes en bomberos requiere programas integrales que articulen múltiples niveles de intervención alineados con la jerarquía de controles ocupacionales. La reclasificación de la IARC en 2022 de la exposición ocupacional como bombero al Grupo 1 (carcinógeno confirmado para humanos) con evidencia suficiente para cáncer de vejiga y mesotelioma establece el imperativo ético y legal de implementar medidas de control efectivas.

Los controles de ingeniería, particularmente los sistemas de extracción de emisiones diésel en estaciones de bomberos, representan la intervención más efectiva para reducir las exposiciones en el cuartel, con evidencia de reducción significativa del carbono elemental y prevención de migración de contaminantes hacia áreas de vida. El uso continuo del equipo de respiración autónoma durante todas las fases de la respuesta a incendios, incluida la fase de remoción, emerge como intervención crítica fundamentada en evidencia de exposición significativa a contaminantes aun cuando las llamas visibles se han extinguido.

La descontaminación del equipo de protección personal con agua, jabón y cepillado demuestra eficacia del 85% en remoción de hidrocarburos aromáticos policíclicos, constituyendo una intervención de bajo costo y alta efectividad que puede implementarse inmediatamente en cualquier departamento de bomberos. La presencia de sustancias perfluoroalquiladas (PFAS) en los textiles del equipo de protección personal representa una fuente de exposición secundaria que requiere gestión específica. El biomonitoreo mediante metabolitos urinarios proporciona





indicadores objetivos de exposición que permiten evaluar la efectividad de las intervenciones implementadas.

Para el contexto del Benemérito Cuerpo de Bomberos de Ecuador, los hallazgos sintetizados en esta revisión fundamentan la implementación de programas de prevención que prioricen las intervenciones de mayor costo-efectividad, comenzando con el uso continuo del ERA, la descontaminación sistemática del EPP, y la higiene personal rigurosa, complementadas según recursos disponibles con sistemas de extracción de emisiones y diseño arquitectónico que minimice la exposición en estaciones.

Recomendaciones

A partir de la síntesis de evidencia científica presentada en esta revisión, se formulan las siguientes recomendaciones para la implementación de programas de prevención de riesgos ocupacionales en el servicio de bomberos.

En controles de ingeniería, se recomienda priorizar la instalación de sistemas de extracción de emisiones diésel (ERS) en las bahías de aparatos de todas las estaciones, comenzando por aquellas con mayor volumen de operaciones. Los sistemas deben diseñarse para captura en fuente con desconexión automática. En estaciones nuevas o remodelaciones, incorporar principios de zonificación arquitectónica que segreguen físicamente las áreas contaminadas de las áreas limpias.

En controles administrativos, establecer como política institucional el uso continuo del equipo de respiración autónoma durante todas las fases de la respuesta a incendios estructurales, incluida la remoción, hasta completar la ventilación y verificación atmosférica con instrumentos calibrados.





Implementar protocolos de descontaminación gruesa obligatoria en el lugar del incendio utilizando agua con jabón líquido y cepillado de superficies externas del EPP.

En gestión del EPP, establecer protocolos de limpieza según NFPA 1851, incluyendo limpieza avanzada después de cada exposición significativa a humo. Desarrollar inventarios que documenten fabricante, modelo y especificaciones de composición para facilitar la gestión de equipos que contienen PFAS. Implementar prácticas que minimicen el contacto dérmico con el EPP fuera del contexto de emergencia.

En vigilancia médica, establecer programas según NFPA 1582 que incluyan historia ocupacional detallada, exámenes físicos periódicos con atención a sistemas respiratorio, dermatológico y cardiovascular, y pruebas de función pulmonar. Considerar la incorporación de biomonitoreo mediante metabolitos urinarios de HAP para valorar la efectividad de las intervenciones.

En capacitación y cultura organizacional, desarrollar programas de entrenamiento inicial y continuo que eduquen al personal sobre los riesgos de exposición, los fundamentos científicos de las medidas de control y los procedimientos específicos a seguir. Fomentar una cultura organizacional que priorice la salud a largo plazo, reconociendo que las exposiciones químicas acumulativas representan un riesgo ocupacional tan significativo como los peligros físicos inmediatos.





Referencias

- Banks, A. P. W., Wang, X., Engelsman, M., Knibb, J. A., Thai, P., & Mueller, J. F. (2021). Decontamination of firefighter turnout gear: Exposure to combustion by-products and effectiveness of laundry cycles. *Environmental Research*, 196, 110399. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.110399>
- Barros, B., Oliveira, M., & Morais, S. (2023). Biomonitoring of firefighting forces: A review on biomarkers of exposure to health-relevant pollutants released from fires. *Journal of Toxicology and Environmental Health Part B: Critical Reviews*, 26(3), 127-171. <https://doi.org/10.1080/10937404.2023.2172119>
- Calvillo, A., Haynes, E., Galli, B., Hopkins, L., Fent, K. W., & Beitel, S. (2019). Pilot study on the efficiency of water-only decontamination for firefighters' turnout gear. *Fire Technology*, 56, 1051-1069. <https://doi.org/10.1007/s10694-019-00920-x>
- DeBono, N. L., Daniels, R. D., Beane Freeman, L. E., Graber, J. M., Hansen, J., Teras, L. R., ... & Glass, D. (2023). Firefighting and cancer: A meta-analysis of cohort studies in the context 38 of cancer hazard identification. *Safety and Health at Work*, 14(2), 141-152. <https://doi.org/10.1016/j.shaw.2023.02.003>
- Fent, K. W., Alexander, B., Roberts, J., Robertson, S., Toennis, C., Sammons, D., ... & Horn, G. (2017). Contamination of firefighter personal protective equipment and skin and the effectiveness of decontamination procedures. *Journal of Occupational and*





Environmental Hygiene, 14(10), 801-814.
<https://doi.org/10.1080/15459624.2017.1334904>

Fent, K. W., Eisenberg, J., Snawder, J., Sammons, D., Pleil, J. D., Stiegel, M. A., Mueller, C., Horn, G. P., & Dalton, J. (2014). Systemic exposure to PAHs and benzene in firefighters suppressing controlled structure fires. *Annals of Occupational Hygiene*, 58(7), 830-845.
<https://doi.org/10.1093/annhyg/meu036>

Fent, K. W., Mayer, A. C., Toennis, C., Sammons, D., Robertson, S., Chen, I. C., Bhandari, D., Blount, B. C., Kerber, S., Smith, D. L., & Horn, G. P. (2022). Firefighters' urinary concentrations of VOC metabolites after controlled-residential and training fire responses. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, 242, 113969.
<https://doi.org/10.1016/j.ijheh.2022.113969>

Fent, K. W., Toennis, C., Engel, L., Mueller, C., Blount, B. C., Calafat, A. M., ... & Kerber, S. (2020). Firefighters' absorption of PAHs and VOCs during controlled residential fires by job assignment and fire attack tactic. *Journal of Exposure Science and Environmental Epidemiology*, 30, 338-349. <https://doi.org/10.1038/s41370-019-0145-2>

Gainey, S. J., Horn, G. P., Towers, A. E., Oelschlager, M. L., Tir, V. L., Drnevich, J., ... & Freund, G. G. (2018). Exposure to a firefighting overhaul environment without respiratory protection increases immune dysregulation and lung disease risk. *PLOS ONE*, 13(8), e0201830. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0201830>

Horn, G. P., Kerber, S., Fent, K. W., Stroud, B., Smith, D. L., & Fernhall, B. (2020). Evaluation of interventions to reduce firefighter exposures.





Journal of Occupational and Environmental Medicine, 62(4), 279-288.

<https://doi.org/10.1097/JOM.0000000000001815>

Hossain, M. T., Girase, A. G., & Ormond, R. B. (2023). Evaluating the performance of surfactant and charcoal-based cleaning products to effectively remove PAHs from firefighter gear. *Frontiers in Materials*, 10, 1142777. <https://doi.org/10.3389/fmats.2023.1142777>

Hwang, J., Xu, C., Agnew, R. J., Clifton, S., & Malone, T. R. (2021). Health risks of structural firefighters from exposure to polycyclic aromatic hydrocarbons: A systematic review and meta-analysis. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(8), 4209. <https://doi.org/10.3390/ijerph18084209>

International Agency for Research on Cancer. (2023). Occupational exposure as a firefighter (IARC Monographs on the Identification of Carcinogenic Hazards to Humans, Vol. 132). IARC.

Keir, J. L. A., Kirkham, T. L., Aranda-Rodriguez, R., White, P. A., & Blais, J. M. (2023). Effectiveness of dermal cleaning interventions for reducing firefighters' exposures to PAHs and genotoxins. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 20(2), 84-94. <https://doi.org/10.1080/15459624.2022.2150768>

Kim, J., Lee, K., Choi, S., & Kim, S. (2019). Evaluation of the effect of an exhaust reduction system in fire stations. *Sustainability*, 11(22), 6358. <https://doi.org/10.3390/su1122635840>

Koslitz, S., Heinrich, B., Käfferlein, H. U., Koch, H. M., Pelzl, T., Pitzke, K., ... & Taeger, D. (2023). Biomonitoring of polycyclic aromatic hydrocarbons in firefighters at fire training facilities and in employees





at respiratory protection and hose workshops. *Frontiers in Public Health*, 11, 1277812. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2023.1277812>

Lee, D. J., Ahn, S., McClure, L. A., Caban-Martinez, A. J., Kobetz, E. N., Ukani, H., ... & Pinheiro, P. S. (2023). Cancer risk and mortality among firefighters: A meta-analytic review. *Frontiers in Oncology*, 13, 1130754. <https://doi.org/10.3389/fonc.2023.1130754>

Maizel, A. C., Shriver-Lake, L. C., Landers, A. Q., Kusterbeck, A. W., Kucklick, J. R., & Davis, R. D. (2023). Per- and polyfluoroalkyl substances in new firefighter turnout gear textiles (NIST Technical Note 2248). National Institute of Standards and Technology.

Maizel, A. C., Shriver-Lake, L. C., Landers, A. Q., Kusterbeck, A. W., Kucklick, J. R., & Davis, R. D. (2024). Per- and polyfluoroalkyl substances in firefighter turnout gear textiles exposed to abrasion, elevated temperature, laundering, or weathering (NIST Technical Note 2260). National Institute of Standards and Technology.

Mayer, A. C., Fent, K. W., Chen, I. C., Sammons, D., Toennis, C., Robertson, S., Kerber, S., Horn, G. P., & Smith, D. L. (2023). Evaluating exposure to VOCs and naphthalene for firefighters wearing different PPE configurations. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 20(7), 6057. <https://doi.org/10.3390/ijerph20076057>

National Fire Protection Association. (2020). NFPA 1500: Standard on fire department occupational safety, health, and wellness program. NFPA.

National Fire Protection Association. (2021). NFPA 1582: Standard on comprehensive occupational medical program for fire departments. NFPA. 41





National Fire Protection Association. (2022). NFPA 1851: Standard on selection, care, and maintenance of protective ensembles for structural fire fighting and proximity fire fighting. NFPA.

Navarro, K. M., West, M. R., O'Dell, K., Sen, P., Chen, I. C., Fischer, E. V., Hornbrook, R. S., Apel, E. C., Hills, A. J., Jarnot, A., DeMott, P., & Domitrovich, J. W. (2021). Exposure to particulate matter and estimation of volatile organic compounds across wildland firefighter job tasks. *Environmental Science and Technology*, 55(17), 11795-11804. <https://doi.org/10.1021/acs.est.1c00847>

Oliveira, M., Slezakova, K., Magalhães, C. P., Fernandes, A., Teixeira, J. P., Delerue-Matos, C., Pereira, M. C., & Morais, S. (2022). Exposure to PAHs during firefighting activities: A review on skin levels, in vitro/in vivo bioavailability, and health risks. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(19), 12677. <https://doi.org/10.3390/ijerph191912677>

Probert, C., Baynes, R. E., & Ormond, R. B. (2024). Impact of skin decontamination wipe solutions on the percutaneous absorption of polycyclic aromatic hydrocarbons. *Toxics*, 12(10), 746. <https://doi.org/10.3390/toxics12100746>

Taeger, D., Koslitz, S., Käfferlein, H. U., Pelzl, T., Heinrich, B., Breuer, D., ... & Brüning, T. (2023). Exposure to polycyclic aromatic hydrocarbons assessed by biomonitoring of firefighters during fire operations in Germany. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, 248, 114110. <https://doi.org/10.1016/j.ijheh.2023.114110>





Wingfors, H., Nyholm, J. R., Magnusson, R., & Wijkmark, C. H. (2018). Impact of fire suit ensembles on firefighter PAH exposures as assessed by skin deposition and urinary 42 biomarkers. *Annals of Work Exposures and Health*, 62(2), 221-231.
<https://doi.org/10.1093/annweh/wxx097>

World Health Organization & International Labour Organization. (2022). *Mental health at work: Policy brief.* WHO.

