



Efectividad de los equipos de protección personal frente a riesgos térmicos en incendios aeroportuarios dentro del Aeropuerto Coronel Edmundo Carvajal.

Effectiveness of personal protective equipment against thermal risks in airport fires within the Coronel Edmundo Carvajal Airport.

Danny Patricio Calo Urbina¹ 

dpcalo@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

Segundo Martin Quito Cortez³ 

martinquito@bqc.com.ec

Instituto Superior Tecnológico Oriente (ITSO)

Riobamba, Ecuador

Recepción: 05-01-2026

Aceptación: 05-02-2026

Publicación: 30-03-2026

Como citar este artículo: Calo, D. Quito, B. Quito, S. (2026). **Efectividad de los equipos de protección personal frente a riesgos térmicos en incendios aeroportuarios dentro del Aeropuerto Coronel Edmundo Carvajal.** *Metrópolis. Revista de Estudios Globales Universitarios*, 7 (1), pp. 487-529

¹ 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 Ingeniero Agrónomo (UNIVERSIDAD CATOLICA DE CUENCA), Magister en Desarrollo Local, Mención Planificación, Desarrollo y Ordenamiento Territorial (UNIVERSIDAD CATOLICA DE CUENCA); Doctor en Ciencias de la Educación (UNIVERSIDAD BICENTENARIA DE ARAGUA) VENEZUELA, Rector Instituto Superior Tecnológico CIC YASUNI Docente.





Resumen

Este artículo científico evaluó la efectividad de los Equipos de Protección Personal (EPP) contra riesgos térmicos en incendios aeroportuarios, tomando como caso de estudio el Aeropuerto Coronel Edmundo Carvajal, mediante un análisis cualitativo que integró revisión documental de normativas internacionales (NFPA, OACI) y evaluación de protocolos operativos locales, se identificó que la protección del bombero aeronáutico no depende únicamente del desempeño técnico del material, sino de un sistema integral que abarca cuatro pilares interconectados el desempeño técnico del EPP conforme a estándares como la NFPA 1971, una gestión organizacional rigurosa, con mantenimiento predictivo y trazabilidad digital del ciclo de vida del equipo, la competencia humana, sustentada en capacitación continua y realista que gestione el estrés térmico fisiológico, la adaptabilidad a riesgos emergentes, como incendios por baterías de iones de litio y nuevos agentes extintores. Los hallazgos demuestran que la optimización de procesos de mantenimiento y formación, incluso en contextos con recursos limitados, impacta más en la seguridad que la mera adquisición de tecnología, se concluye que garantizar la efectividad del EPP requiere una inversión estratégica y balanceada que priorice la sostenibilidad de los sistemas de gestión y la capacitación del capital humano, adoptando una visión holística donde el equipo, los procedimientos y las personas se fortalezcan mutuamente para construir una respuesta de emergencia verdaderamente resiliente.

Palabras claves: Equipos de Protección Personal, Riesgos Térmicos, Incendios Aeroportuarios, NFPA, Estrés Térmico.

Abstract

This scientific article evaluated the effectiveness of Personal Protective Equipment (PPE) against thermal risks in airport fires, taking the Coronel Edmundo Carvajal Airport as a case study. Through a qualitative analysis that integrated a documentary review of international regulations (NFPA, ICAO) and an evaluation of local operational protocols, it was identified that the protection of the aeronautical firefighter does not depend solely on the technical performance of the material, but on an integral system that encompasses four interconnected pillars: the technical performance of the PPE according to standards such as NFPA 1971, rigorous organizational management, with predictive maintenance and digital traceability of the equipment's life cycle, human competence, supported by continuous and realistic training that manages physiological thermal stress, and adaptability to emerging risks, such as fires caused by lithium-ion batteries and new extinguishing agents. The findings demonstrate that optimizing maintenance and training processes, even in resource-limited contexts, has a greater impact on safety than simply acquiring technology. It is concluded that ensuring the effectiveness of PPE requires a strategic and balanced investment that prioritizes the sustainability of management systems and the training of human capital, adopting a holistic vision where equipment, procedures, and people mutually reinforce each other to build a truly resilient emergency response. **Keywords:** Personal Protective Equipment, Thermal Hazards, Airport Fires, NFPA, Heat Stress.





Introducción.

Los servicios de rescate y extinción de incendios en aeronaves (ARFF) se enfrentan a escenarios de extrema complejidad y peligrosidad, caracterizados por la liberación de grandes cantidades de combustible de aviación que generan incendios de alta intensidad con riesgos térmicos inmediatamente letales para el personal de respuesta (Calo Urbina et al., 2025).

En este contexto, el equipo de protección personal (EPP) constituye la última barrera entre el bombero y las amenazas de calor radiante, contacto directo con las llamas y gases tóxicos. Su efectividad no es solo un asunto de cumplimiento normativo, sino un factor decisivo para la supervivencia del respondedor y el éxito operativo durante una emergencia. Por ello, esta investigación se centra en evaluar dicha efectividad en el contexto específico del Aeropuerto Coronel Edmundo Carvajal.

El entorno térmico en un incendio de aeronave difiere significativamente del presente en un incendio estructural convencional, las llamas generadas por combustibles como el queroseno son altamente peligrosas, produciendo una carga térmica que lleva al límite los materiales del EPP (Quisataczi Paredes et al., 2025).

Además del riesgo externo, el propio equipo genera un microclima que dificulta la disipación del calor metabólico del bombero, pudiendo provocar un estrés térmico acelerado que se manifiesta en hipertermia, deshidratación y deterioro cognitivo y motor (Quisataczi Paredes et al., 2025).





Esta combinación de factores evidencia la necesidad crítica de que el EPP no solo brinde una protección térmica robusta, sino que también permita gestionar de manera adecuada la comodidad y la carga fisiológica del usuario, en este sentido la investigación busca responder a la pregunta: ¿En qué medida el EPP utilizado por los bomberos del Aeropuerto Coronel Edmundo Carvajal es efectivo para proteger contra los riesgos térmicos propios de un incendio aeronáutico, considerando su desempeño técnico, los protocolos de mantenimiento implementados y la gestión del estrés térmico del personal?

Para abordar este interrogante, se aplicará una metodología cualitativa de tipo exploratorio-descriptivo, la elección de este enfoque responde a que los objetivos del estudio se orientan a comprender percepciones, experiencias y procedimientos en un contexto específico, más que a medir variables de manera aislada, este diseño permite analizar fenómenos complejos dentro de su entorno real, integrando diversas fuentes de información.

El diseño metodológico incorporará un análisis documental sistemático de los registros de mantenimiento del EPP y de los informes operativos del aeropuerto, complementado con entrevistas semiestructuradas al personal especializado de la brigada ARFF. Esta triangulación facilitará una comprensión integral del problema, combinando datos técnicos con la experiencia práctica de los usuarios.

El propósito final es generar evidencia aplicada que contribuya a optimizar los protocolos de seguridad, fortaleciendo la integridad física de los bomberos aeroportuarios y la eficacia de las operaciones de respuesta en el Aeropuerto Coronel Edmundo Carvajal.





Marco Teórico.

El estudio de la efectividad del equipo de protección personal (EPP) en incendios aeroportuarios requiere precisión conceptual para establecer parámetros de evaluación consistentes. El EPP se define como el conjunto de dispositivos, prendas y accesorios destinados a proteger al bombero aeronáutico frente a riesgos que amenazan su seguridad y salud durante operaciones de respuesta a emergencias. En los servicios de rescate y extinción de incendios en aeronaves (ARFF), este equipo constituye la última barrera de defensa ante múltiples amenazas simultáneas, lo que demanda estándares de calidad y desempeño superiores a los aplicados en otros contextos de bomberos.

Los riesgos térmicos en incendios aeroportuarios presentan características que trascienden la conceptualización de incendios estructurales. Estos riesgos incluyen amenazas térmicas convectivas, radiantes y de contacto, que pueden manifestarse de forma simultánea o secuencial con temperaturas extremas asociadas a combustibles de aviación. La complejidad de estos fenómenos exige una comprensión multidimensional que integre las características físicas del fuego, los mecanismos de transferencia de calor hacia el cuerpo del bombero y los límites de tolerancia fisiológica humana ante exposiciones térmicas intensas (Calo Urbina et al., 2025).

El contexto operativo del Aeropuerto Coronel Edmundo Carvajal introduce variables específicas que condicionan la efectividad del EPP. La seguridad aérea, entendida como la prevención de actos delictivos contra aeronaves y ocupantes, ha evolucionado significativamente tras los atentados del 11 de septiembre de 2001, dando lugar a normativas internacionales más estrictas. Sin embargo, esta evolución se ha centrado en la prevención de





interferencias ilícitas, con un desarrollo regulatorio limitado para la protección de los respondedores ante emergencias térmicas. Este vacío normativo constituye un punto crítico que busca identificar.

Es por ello que efectividad del EPP frente a riesgos térmicos se sustenta en marcos teóricos interdisciplinarios, la Teoría de la Motivación de Protección (Protection Motivation Theory) aporta un enfoque psicológico que explica cómo la percepción de vulnerabilidad, la gravedad de la amenaza, la eficacia de la respuesta y la autoeficacia influyen en el uso adecuado del EPP bajo condiciones de estrés térmico extremo. Por su parte, la Teoría de la Confiabilidad Organizacional (High-Reliability Theory) describe cómo organizaciones que operan en entornos de alto riesgo, como los servicios ARFF, desarrollan capacidades para mantener operaciones seguras pese a condiciones extremas.

Tomándolo desde la perspectiva ergonómica y fisiológica, el Modelo de Demandas y Recursos Laborales (Job Demands-Resources Model) permite analizar la relación entre las exigencias térmicas del entorno (demandas) y las características del EPP (recursos), un desequilibrio persistente entre ambas puede generar deterioro del desempeño, incremento del error humano y compromisos en la seguridad del respondedor. La articulación de estas perspectivas teóricas proporciona una base sólida para evaluar integralmente la efectividad del EPP en condiciones operativas reales.

El marco regulatorio internacional de la protección contra incendios en aeropuertos se fundamenta en el Convenio sobre Aviación Civil Internacional (Chicago, 1944), que estableció la Organización de Aviación Civil Internacional (OACI) como ente rector global, el Anexo 17 se ocupa principalmente de la prevención de actos ilícitos, sus disposiciones han influido indirectamente en la definición de estándares de protección para





respondedores, mediante la obligación de los Estados de implementar programas integrales de seguridad aeroportuaria, aunque persisten vacíos respecto a requisitos específicos de protección térmica para bomberos aeroportuarios (Quisataczi Paredes et al., 2025).

En el ámbito nacional, los estándares para EPP en incendios se articulan mediante regulaciones de seguridad ocupacional y normativas técnicas específicas, el Código de Regulaciones de California, Título 8, exige a los empleadores identificar peligros, definir medidas de protección, seleccionar el EPP adecuado y capacitar al personal en su uso. Los estándares técnicos provienen principalmente de la National Fire Protection Association (NFPA) y el American National Standards Institute (ANSI), la norma ANSI Z89.1 establece requisitos para cascos de seguridad, mientras que los estándares ASTM F2412-95 y ASTM F213-05 regulan el calzado de protección. Estos documentos especifican criterios de desempeño térmico, durabilidad y compatibilidad entre componentes del EPP. Para la protección de manos, los estándares determinan que el tipo de guante debe adecuarse a los peligros específicos, lo cual resulta esencial en entornos aeroportuarios con múltiples riesgos simultáneos.

Asumiendo que la efectividad del EPP en incendios aeroportuarios depende del cumplimiento de especificaciones técnicas avanzadas que superan las exigencias para incendios estructurales. Los materiales deben resistir ignición, limitar la transferencia de calor y mantener su integridad ante exposición a llamas directas y radiación intensa. Estas características se evalúan mediante pruebas estandarizadas como el Thermal Protective Performance Test (TPP) y el Radiant Protective Performance Test (RPP).

El diseño del EPP debe integrar un sistema de capas que combine barreras contra humedad y químicos aeronáuticos, además de gestionar el estrés





fisiológico. Incluye respiradores autónomos compatibles con el resto del equipo, sistemas de refrigeración para reducir el calor metabólico y elementos reflectantes para mejorar la visibilidad en ambientes con humo denso. La certificación internacional del EPP exige pruebas independientes que verifiquen su desempeño térmico, durabilidad mecánica y compatibilidad entre componentes (Quisataczi Paredes et al., 2025).

En conjunto, este marco teórico evidencia la complejidad multidimensional del estudio de la efectividad del EPP frente a riesgos térmicos en incendios aeroportuarios. La integración de perspectivas técnicas, humanas y organizacionales revela la necesidad de enfoques analíticos que superen visiones fragmentadas y permitan identificar vacíos regulatorios, especialmente en contraste con los sólidos marcos dirigidos a la seguridad contra actos ilícitos. Este marco proporciona los cimientos conceptuales para el análisis empírico de la efectividad del EPP en el Aeropuerto Coronel Edmundo Carvajal, orientando las categorías y relaciones que guiarán la investigación.

Estado del Arte

El estudio de la efectividad de los equipos de protección personal (EPP) en contextos de incendios aeroportuarios representa un área de investigación crítica para la seguridad de los respondedores de emergencias. En los últimos años, la literatura especializada ha evidenciado avances significativos en la comprensión de los mecanismos de protección térmica, aunque persisten importantes vacíos de conocimiento, particularmente en lo que respecta a la optimización integral de los sistemas de protección bajo condiciones operativas reales (Calo Urbina et al., 2025). Este estado del arte sintetiza los hallazgos más relevantes de investigaciones recientes,





identificando tendencias metodológicas y delineando perspectivas futuras para el desarrollo de EPP más efectivos en escenarios de incendios aeroportuarios.

La investigación sobre materiales para protección térmica ha experimentado notables progresos en la última década. Los estudios se han centrado en caracterizar el comportamiento termo físico de textiles avanzados bajo condiciones de exposición extremas, similares a las encontradas en incendios de combustible de aviación. Las investigaciones de Quisataczi Paredes et al. (2025) han demostrado que la transferencia de calor a través de materiales multicapa sigue patrones no lineales que dependen críticamente de la intensidad y duración de la exposición térmica. Estos hallazgos han permitido desarrollar modelos predictivos más precisos sobre el rendimiento de barrera térmica de los conjuntos de protección.

Metodológicamente, se observa una transición desde pruebas estandarizadas convencionales hacia protocolos de evaluación que incorporan exposiciones térmicas combinadas, simulando de manera más fiel las condiciones reales de incendios aeroportuarios. El uso de maniqués instrumentados de última generación, equipados con sensores de alta densidad, ha permitido cuantificar con mayor precisión la distribución espacial de la transferencia de calor y predecir la magnitud y localización de lesiones térmicas potenciales (Quisataczi Paredes et al., 2025).

Uno de los avances más significativos en la literatura reciente corresponde al reconocimiento del estrés térmico fisiológico como factor determinante en la efectividad global del EPP. Las investigaciones han establecido consistentemente que, si bien los materiales modernos ofrecen protección





adecuada contra amenazas térmicas externas, simultáneamente comprometen la termorregulación corporal, acelerando la aparición de hipertermia y deterioro del desempeño cognitivo y motor (Quisataczi Paredes et al., 2025).

Esta comprensión ha impulsado el desarrollo de sistemas de refrigeración integrados y estrategias de diseño orientadas a optimizar el balance entre protección y carga fisiológica. Los estudios más recientes exploran soluciones que incluyen materiales de cambio de fase, sistemas de ventilación activa y textiles con propiedades de gestión de humedad mejoradas. Sin embargo, la implementación generalizada de estas tecnologías en contextos operativos reales sigue siendo limitada, particularmente en aeropuertos regionales con restricciones presupuestarias.

La investigación sobre protocolos de mantenimiento ha revelado que la degradación progresiva de las propiedades de protección de los EPP constituye un factor frecuentemente subestimado en la evaluación de su efectividad a largo plazo. El trabajo de Calo Urbina et al. (2025) demostró que la implementación de protocolos de mantenimiento preventivo-predictivo en el Aeropuerto Coronel Edmundo Carvajal redujo en aproximadamente 30% las reparaciones no planificadas de los equipos de respuesta.

Los estudios coinciden en señalar que métodos inadecuados de limpieza y descontaminación, como el uso de lavadoras domésticas o el secado al sol directo, aceleran significativamente la degradación de las fibras resistentes a la llama, comprometiendo la integridad del sistema de protección. La literatura especializada enfatiza la necesidad de implementar sistemas de





trazabilidad digital que documenten el historial completo de mantenimiento, exposición a incidentes y condiciones de almacenamiento de cada conjunto de EPP.

Se puede evidenciar un enfoque desproporcionado en grandes aeropuertos internacionales, con escasa atención a las particularidades operativas y logísticas de aeropuertos regionales como el Coronel Edmundo Carvajal. Se identifica la necesidad de desarrollar protocolos de evaluación y mantenimiento adaptados a contextos con recursos limitados, donde la optimización de procedimientos existentes puede ofrecer mejoras significativas en la efectividad del EPP sin requerir inversiones sustanciales.

Aunque existen desarrollos promisorios en áreas como sensores integrados para monitoreo en tiempo real de condiciones ambientales y fisiológicas, materiales de cambio de fase para gestión activa de temperatura, y textiles avanzados con propiedades de auto reparación, la transición de estas tecnologías desde laboratorios de investigación hacia implementación operativa generalizada sigue siendo limitada. Se requieren estudios que evalúen la viabilidad práctica de estas soluciones en entornos aeroportuarios reales.

Finalmente, se identifica una tendencia hacia la armonización internacional de estándares de evaluación, con esfuerzos coordinados para establecer protocolos que consideren de manera más comprehensiva las amenazas multidimensionales presentes en incendios aeroportuarios, incluyendo no solo riesgos térmicos, sino también exposición a productos de combustión tóxicos y estrés biomecánico.





El estado del arte evidencia avances significativos en la comprensión de los factores que determinan la efectividad de los EPP frente a riesgos térmicos en incendios aeroportuarios. Sin embargo, persisten importantes desafíos para traducir estos conocimientos en mejoras tangibles en la protección de los respondedores, particularmente en contextos operativos reales y en aeropuertos con recursos limitados. Las investigaciones futuras deberían enfocarse en abordar los vacíos identificados, con especial atención al desarrollo de soluciones prácticas, costo-efectivas y adaptadas a las particularidades de diferentes contextos aeroportuarios.

Desarrollo.

Las operaciones de Rescate y Extinción de Incendios en Aeronaves (ARFF), representan uno de los entornos más exigentes y técnicamente complejos para los cuerpos de bomberos aeroportuarios. La singularidad de estos escenarios radica en la combinación de factores de riesgo que incluyen la presencia de grandes cantidades de combustible de aviación, geometrías confinadas en las aeronaves y la necesidad de respuestas ultrarrápidas donde la diferencia entre la vida y la muerte se mide en segundos (Calo Urbina et al., 2025), en este contexto, el equipo de protección personal (EPP) constituye el último eslabón en la cadena de seguridad del respondedor, cuya efectividad no solo depende de sus características técnicas intrínsecas, sino también de su integración con procedimientos operativos estandarizados, mantenimiento preventivo y capacitación continua (Quisataczi Paredes et al., 2025).

El Aeropuerto Coronel Edmundo Carvajal, como infraestructura crítica regional, enfrenta el desafío permanente de mantener niveles óptimos de preparación ante emergencias, lo que incluye la dotación, gestión y





mantenimiento de EPP especializado para su personal de respuesta (Calo Urbina et al., 2025), la evaluación de la efectividad de estos equipos requiere un análisis multidimensional que considere normativas internacionales, avances tecnológicos en materiales de protección, fisiología del esfuerzo bajo estrés térmico y protocolos de validación bajo condiciones que simulen escenarios realistas de incendio aeronáutico.

Los incendios en entornos aeroportuarios presentan características particulares que los diferencian significativamente de los incendios estructurales convencionales, la magnitud de los combustibles involucrados, principalmente queroseno de aviación genera condiciones térmicas extremas con temperaturas que pueden alcanzar hasta 1.200°C en los puntos de mayor intensidad (Quisataczi Paredes et al., 2025), además, la presencia de materiales compuestos en las estructuras de las aeronaves modernas introduce nuevos riesgos relacionados con la emisión de gases tóxicos y partículas en suspensión durante la combustión, lo que añade capas adicionales de complejidad a los requerimientos de protección.

La velocidad de desarrollo de los incendios en aeronaves es otro factor crítico que impacta directamente en los requerimientos del EPP. Estudios realizados en simulaciones de incendios en fuselajes han demostrado que el tiempo disponible para evacuación puede ser tan breve como 90 segundos en condiciones de incendio no controlado, estableciendo una ventana de respuesta extremadamente ajustada para los equipos de rescate (Calo Urbina et al., 2025), esta temporalidad condiciona no solo las estrategias de intervención sino también las características de diseño del





EPP, que debe permitir una movilidad óptima sin comprometer los niveles de protección necesarios.

Regulaciones Internacionales Especializadas

El marco regulatorio para la protección contra incendios en aeropuertos se fundamenta predominantemente en normativas internacionales especializadas, siendo las más relevantes las publicadas por la National Fire Protection Association (NFPA) y los estándares establecidos por la Organización de Aviación Civil Internacional (OACI). Esta dependencia de normativa internacional se explica porque las regulaciones locales frecuentemente carecen de la especificidad técnica requerida para establecer niveles adecuados de protección para este tipo de edificaciones especializadas (Calo Urbina et al., 2025).

Entre las normas NFPA más críticas para operaciones ARFF se encuentran la NFPA 402 que establece la guía para la Operación de Rescate y Combate de Incendios en Aeronaves, la NFPA 403 que norma los servicios de rescate en aeropuertos, la NFPA 405 sobre la competencia del personal ARFF, y la NFPA 1971 que especifica los estándares sobre equipos de protección para bomberos estructurales, aplicable a componentes del EPP. La OACI complementa este marco mediante estándares operativos que los estados signatarios, incluido Ecuador, deben incorporar en su legislación nacional, estableciendo requisitos mínimos para equipos y capacitación del personal de respuesta ante emergencias aeronáuticas.

La normativa NFPA 1971 representa particularmente un pilar fundamental en la estandarización de los equipos de protección, estableciendo requisitos detallados para el desempeño térmico de los materiales,





resistencia a la penetración de líquidos, durabilidad frente al uso repetido y compatibilidad entre los diferentes componentes del sistema de protección. Estos estándares se revisan periódicamente para incorporar avances tecnológicos y lecciones aprendidas de incidentes reales, manteniendo su relevancia y efectividad en la protección de los respondedores.

Adicionalmente, la Administración Federal de Aviación de los Estados Unidos (FAA) establece requisitos específicos a través de sus directivas técnicas, las cuales frecuentemente son adoptadas como referencia por autoridades aeronáuticas de otros países. Estas directivas cubren aspectos que van desde la capacitación del personal hasta las especificaciones técnicas de los equipos de respuesta, creando un entramado regulatorio comprehensivo que busca garantizar niveles uniformes de seguridad en la aviación civil internacional.

Especificaciones Técnicas y Protocolos de Certificación

Los procesos de certificación de EPP para uso en entornos ARFF involucran evaluaciones rigurosas que simulan condiciones operativas extremas. Estas evaluaciones incluyen pruebas de resistencia a llamas directas, exposición a calor radiante intenso, ensayos de integridad estructural bajo stress térmico y validación de la compatibilidad entre los diferentes componentes del sistema de protección. Los protocolos de prueba estandarizados, como el método de prueba de desempeño de protección térmica (TPP), proporcionan métricas objetivas para comparar el rendimiento de diferentes materiales y diseños.





El proceso de certificación también considera la ergonomía y la interfaz humano-equipo, reconociendo que la protección teórica ofrecida por los materiales puede verse comprometida si el equipo limita significativamente la movilidad, la destreza manual o la capacidad de comunicación del usuario. Pruebas de movilidad que simulan actividades como gatear, subir escaleras o arrastrar mangueras bajo condiciones de baja visibilidad forman parte integral de los protocolos de evaluación para EPP de categoría ARFF.

La trazabilidad de los certificados y la validez temporal de las homologaciones constituyen aspectos críticos frecuentemente descuidados en contextos operativos con restricciones presupuestarias. Los equipos deben ser sometidos a reevaluaciones periódicas y los fabricantes están obligados a notificar cualquier cambio en los procesos de producción o materiales que pueda afectar el desempeño del producto certificado. Este seguimiento continuo asegura que los equipos en servicio mantengan los niveles de protección para los cuales fueron originalmente diseñados y certificados.

Mecanismos de Transferencia de Calor y Estrategias de Protección

La efectividad primaria del EPP frente a riesgos térmicos se determina por la capacidad de sus materiales constituyentes para resistir la transferencia de calor bajo diferentes mecanismos: convectivo mediante llamas y gases calientes, radiante por radiación térmica de incendios de combustible, y conductivo por contacto con superficies calientes (Quisataczi Paredes et al., 2025). En incendios de combustible de aviación, donde las temperaturas pueden superar los 1.100°C, el tiempo de resistencia térmica antes de que





ocurra transferencia de calor crítica hacia la piel del usuario se convierte en un parámetro vital.

Los materiales de barrera térmica en trajes de protección avanzados incorporan múltiples capas con funciones específicas: una capa exterior reflectiva para radiación térmica, capas intermedias de materiales aislantes como aramidas (Nomex, Kevlar) o PBI (Polibenzimidazol), y una capa interior de confort que gestiona la humedad mientras mantiene las propiedades de barrera. El diseño ergonómico que permite movilidad sin comprometer la protección es especialmente crítico en operaciones ARFF, donde los respondedores deben maniobrar en espacios confinados dentro de aeronaves con visibilidad reducida.

La protección contra calor radiante, particularmente relevante en incendios de combustible de aviación donde las llamas pueden extenderse sobre grandes áreas, requiere materiales con alta reflectividad superficial y baja emisividad térmica. Las superficies metalizadas o de colores claros han demostrado superioridad en la reflexión de radiación infrarroja, aunque presentan desafíos adicionales relacionados con su durabilidad y resistencia al ensuciamiento durante operaciones extendidas.

Para la protección contra calor convectivo de llamas directas, la resistencia a la ignición y la baja propagación de llama son características esenciales. Los materiales utilizados deben mantener su integridad estructural incluso cuando están expuestos a temperaturas extremas, evitando el encogimiento, el goteo o la formación de agujeros que comprometan la barrera de protección. Las telas de múltiples capas con diferentes propiedades complementarias han demostrado la mayor efectividad en este tipo de exposiciones.





Gestión del Estrés Térmico Fisiológico y Termorregulación

Uno de los desafíos más significativos en el uso de EPP para incendios aeroportuarios es la gestión del estrés térmico fisiológico. El equipo, aunque esencial para la protección contra amenazas externas, inevitablemente compromete los mecanismos naturales de termorregulación corporal, creando un microclima interno que puede acelerar la aparición de hipertermia, deshidratación y deterioro del desempeño cognitivo y motor (Quisataczi Paredes et al., 2025).

El cuerpo humano responde al estrés térmico mediante incrementos en la temperatura central corporal y frecuencia cardíaca. Cuando el organismo no puede disipar el exceso de calor, se producen efectos progresivos que incluyen pérdida de concentración, irritabilidad, disminución del deseo de hidratación, y en etapas avanzadas, desmayos e incluso la muerte si no se implementan medidas de enfriamiento. Estos factores son particularmente relevantes en el contexto del Aeropuerto Coronel Edmundo Carvajal, donde las condiciones ambientales de la región pueden exacerbar la carga térmica sobre los respondedores.

El índice WBGT (Temperatura de Bulbo Húmedo y Globo) se establece como herramienta fundamental para evaluar la contribución ambiental al estrés térmico, permitiendo implementar estrategias administrativas como ciclos trabajo-descanso, hidratación forzada y periodos de aclimatación. Tecnologías emergentes en EPP incorporan sistemas de refrigeración activa y pasiva, como chalecos refrigerantes, materiales de cambio de fase y sistemas de ventilación asistida, aunque su implementación en aeropuertos regionales puede verse limitada por restricciones presupuestarias.





La fisiología del estrés térmico bajo EPP implica complejas interacciones entre la producción metabólica de calor, la transferencia de calor desde el ambiente externo a través del equipo, y la capacidad del cuerpo para disipar ese calor acumulado. Durante actividades físicamente demandantes como las operaciones ARFF, la tasa metabólica puede multiplicarse por diez respecto a los niveles de reposo, generando entre 500 y 1000 W de potencia térmica que deben ser disipados para mantener la homeostasis corporal.

Los sistemas de refrigeración personal (PSPC, por sus siglas en inglés) representan una tecnología prometedora para mitigar el estrés térmico. Estos sistemas pueden clasificarse en activos (que requieren energía externa) y pasivos (que operan sin fuente de energía externa). Los sistemas activos incluyen chalecos con circulación de líquido refrigerado, mientras los sistemas pasivos utilizan materiales de cambio de fase (PCM) que absorben calor durante su transición de estado sólido a líquido. Los PCM han demostrado capacidad para extender el tiempo operativo seguro entre un 20% y 50% dependiendo de las condiciones ambientales y la intensidad del trabajo.

Ergonomía y Factores Humanos en el Diseño de EPP

La efectividad operativa del EPP no depende exclusivamente de sus propiedades de barrera térmica, sino también de su compatibilidad con las demandas físicas y cognitivas del usuario durante operaciones de alto estrés. Los factores humanos en el diseño de EPP incluyen consideraciones sobre peso, distribución de masa, restricción de movimiento, interfaz de visualización, y compatibilidad con otros equipos como sistemas de respiración autónoma y dispositivos de comunicación.





El peso total del EPP completo para operaciones ARFF puede variar entre 20 y 30 kg, dependiendo de los niveles de protección requeridos y los sistemas auxiliares incorporados. Esta carga adicional impacta significativamente la movilidad, incrementa el consumo energético durante el desplazamiento, y acelera la aparición de fatiga. Estudios ergonómicos han demostrado que, por cada kilogramo adicional en los pies, el costo metabólico equivalente es aproximadamente cinco veces mayor que el mismo peso adicional en el torso, destacando la importancia de optimizar el diseño del calzado de protección.

La restricción de movimiento impuesta por el EPP afecta particularmente actividades que requieren alcance overhead, flexión profunda de rodillas, o movimientos de gateo en espacios confinados. Las articulaciones estratégicamente ubicadas, los sistemas de ajuste personalizado, y la selección de materiales con propiedades mecánicas balanceadas entre resistencia y flexibilidad, son estrategias de diseño que buscan maximizar el rango de movimiento sin comprometer la protección.

La interfaz de visualización a través de los sistemas de protección facial representa otro desafío ergonómico crítico. Los materiales transparentes deben mantener sus propiedades ópticas bajo condiciones de exposición a calor intenso, cambios bruscos de temperatura, y exposición a agentes químicos como los concentrados de espuma. La distorsión visual, el empañamiento, y la acumulación de residuos en las superficies transparentes pueden reducir significativamente la efectividad operativa y aumentar el riesgo de accidentes durante las intervenciones.





Componentes Críticos de Infraestructura y sus Riesgos Asociados

La efectividad del EPP no puede analizarse de forma aislada, sino como parte de un sistema integral de protección contra incendios que incluye múltiples componentes con riesgos específicos. La terminal de pasajeros representa edificios con alta carga de ocupación y opciones restringidas de evacuación, que según NFPA 415 deben protegerse con rociadores automáticos y sistemas de alarma por voz. La proximidad a operaciones de abastecimiento de combustible requiere especial atención a fachadas vidriadas, que pueden necesitar aspersores en vidrieras para protección contra incendios externos.

La torre de control constituye infraestructura crítica donde la evacuación durante emergencias es particularmente problemática por sus implicaciones en seguridad pública, requiriendo escaleras a prueba de humo y sistemas de protección redundantes. Los puentes de desembarque deben ofrecer vías de evacuación adecuadas durante al menos 5 minutos en condiciones equivalentes a un incendio libre de gasolina de avión, según establece NFPA 415, las áreas de rampa y pista, donde se manejan continuamente grandes cantidades de líquidos inflamables, exigen criterios de drenaje e inclinación para prevenir la exposición innecesaria de la terminal en caso de derrame de combustible. Los hangares presentan riesgos singulares al combinar aeronaves con combustible residual, trabajos en caliente y grandes espacios techados, requiriendo típicamente sistemas de rociadores agua-espuma según define la NFPA 409.

Cada uno de estos componentes de infraestructura presenta perfiles de riesgo diferenciados que influyen en los requerimientos específicos del EPP. Las operaciones en hangares, por ejemplo, pueden involucrar





exposición simultánea a riesgos térmicos, químicos y de radiación UV durante trabajos de soldadura, demandando EPP con capacidades de protección multifuncional. Las intervenciones en áreas de rampa frecuentemente combinan riesgo de incendio de combustibles con posibilidad de derrames de sustancias químicas como fluidos hidráulicos o agentes deshielo, requiriendo EPP con resistencia química adicional a la protección térmica básica.

Sistemas de Extinción y su Interfaz con el EPP

Los sistemas fijos de extinción en aeropuertos incluyen diversas tecnologías que interactúan directamente con el EPP utilizado por los respondedores. Los rociadores automáticos aplicados en terminales, hangares y áreas públicas presentan consideraciones de compatibilidad con protección térmica y visibilidad en ambientes con vapor de agua. Los sistemas por gas en salas de equipos eléctricos y telecomunicaciones requieren compatibilidad con SCBA y conllevan riesgo de atmósferas deficientes en oxígeno. Los sistemas por espuma en rampas e incendios de combustible exigen resistencia química a concentrados de espuma y propiedades antideslizantes en el EPP. Los sistemas agua-espuma en hangares y áreas de mantenimiento demandan resistencia a soluciones espumógenas y permeabilidad limitada.

Un aspecto crítico en la efectividad del EPP es su compatibilidad con los agentes extintores utilizados en el aeropuerto. Recientemente ha surgido preocupación por los efectos en la salud de las sustancias perfluoroalquiladas y polifluoroalquiladas (PFAS) presentes en las espumas formadoras de película acuosa (AFFF), tradicionalmente utilizadas en aeropuertos. Estudios han asociado la exposición a PFAS con problemas de





salud como cáncer, supresión del sistema inmunitario y enfermedad de la tiroides, lo que ha llevado a la transición hacia espumas sintéticas (SFFF) que presentan diferentes características de desempeño y requieren entrenamiento específico para su uso seguro.

La interfaz entre los sistemas de extinción automáticos y el EPP merece consideración especial durante las operaciones. La activación inadvertida de rociadores durante intervenciones puede crear condiciones de visibilidad reducida y superficies resbaladizas que aumentan el riesgo de accidentes. Los sistemas de agua pulverizada pueden generar vapor instantáneo cuando impactan superficies calientes, creando riesgo de quemaduras por vapor que debe ser considerado en el diseño de las barreras térmicas del EPP. La compatibilidad química entre los materiales del EPP y los agentes extintores debe ser verificada experimentalmente, ya que algunos concentrados de espuma pueden degradar ciertos materiales textiles o afectar sus propiedades de resistencia al fuego.

Adecuación a Riesgos Específicos y Condiciones Locales

El análisis de los riesgos particulares del Aeropuerto Coronel Edmundo Carvajal revela necesidades específicas de protección para su personal de respuesta. Según evidencia recogida en el plan de seguridad del aeropuerto, existen falencias en cuanto a algunos parámetros de seguridad y al incumplimiento de los mismos, que pueden poner en riesgo tanto a usuarios como al personal operativo (Calo Urbina et al., 2025). Estas deficiencias impactan directamente en la efectividad del EPP disponible, particularmente en aspectos como la dotación y disponibilidad de equipos suficientes para todos los miembros del equipo de respuesta y turnos, la compatibilidad de sistemas entre trajes de protección, aparatos de





respiración autónoma (SCBA), protección ocular y auditiva, y elementos de comunicación, el mantenimiento y vida útil mediante protocolos documentados para limpieza, descontaminación, inspección y reemplazo de componentes deteriorados, y la capacitación en uso adecuado mediante entrenamiento práctico regular que incluya escenarios realistas con estrés térmico simulado.

Las condiciones climáticas específicas de la región donde se ubica el aeropuerto introducen consideraciones adicionales para la selección y uso del EPP. Las temperaturas ambientales elevadas típicas de la zona incrementan la carga térmica basal sobre los respondedores, reduciendo el tiempo operativo seguro antes de alcanzar niveles críticos de estrés térmico. La alta humedad relativa afecta la efectividad de los mecanismos de enfriamiento evaporativo del cuerpo, acelerando la deshidratación y el incremento de la temperatura central. Estas condiciones ambientales deben ser consideradas en la definición de los protocolos operativos, estableciendo ciclos trabajo-descanso más frecuentes y periodos de hidratación obligatoria durante intervenciones extendidas.

La implementación de un Plan Maestro de Seguridad contra Incendios para evaluar lo que debe hacerse, y cómo llevarlo a cabo de la mejor forma para que el aeropuerto mejore su nivel de seguridad contra incendios, representa una oportunidad para abordar estas deficiencias de manera sistemática. Dicho plan debe incluir un análisis exhaustivo de riesgos específicos, considerando no solo los escenarios de incendio más probables sino también aquellos de mayor consecuencia, estableciendo los requerimientos de EPP en función de este análisis de riesgos contextualizado.





Integración con Protocolos de Respuesta a Emergencias y Entrenamiento

La efectividad del EPP se maximiza cuando su uso se integra coherentemente con los protocolos de respuesta a emergencias establecidos. En el contexto ARFF, donde los tiempos de respuesta son críticos -las paredes de aluminio de un avión intacto pueden ofrecer apenas 3 minutos de supervivencia a los ocupantes expuestos a incendio exterior- la facilidad de donning (colocación) del equipo adquiere importancia vital (Calo Urbina et al., 2025).

Los procedimientos de Rescate y Extinción de Incendios en Aeronaves (ARFF) deben incluir especificaciones detalladas sobre tiempos máximos de respuesta desde la alerta hasta el inicio de las operaciones, coordinación entre unidades de respuesta y comunicación con control de tránsito aéreo, tácticas de aproximación a aeronaves incendiadas que minimicen la exposición a riesgos térmicos, y protocolos de descontaminación posterior a la intervención, particularmente cuando se han utilizado agentes espumógenos. La auditoría regular del servicio de salvamento y extinción de incendios de acuerdo con normas como NFPA 402, 403, 422 y 424, así como los estándares OACI, garantiza que tanto el equipo como los procedimientos mantengan niveles adecuados de efectividad operativa.

El entrenamiento con el EPP bajo condiciones realistas es un componente esencial para asegurar su efectividad operativa. Los programas de capacitación deben incluir ejercicios periódicos que simulen las condiciones térmicas, de visibilidad y de estrés físico experimentados durante emergencias reales, permitiendo a los usuarios familiarizarse con las limitaciones y capacidades de su equipo en un entorno controlado. La





medición de parámetros fisiológicos durante estos ejercicios, como temperatura central, frecuencia cardíaca y tasa de sudoración, proporciona datos valiosos para ajustar los protocolos operativos y personalizar las estrategias de gestión del estrés térmico individual.

La integración del EPP con otros sistemas críticos durante las operaciones merece especial atención en los programas de entrenamiento. La compatibilidad entre el equipo de protección y los sistemas de comunicación, iluminación, herramientas de forcé.

Experiencias Internacionales en la Gestión de EPP

El análisis comparativo de diferentes aeropuertos a nivel internacional revela patrones comunes en los desafíos enfrentados en la protección de bomberos ARFF. En el Aeropuerto Internacional de México (AICM), se identificaron deficiencias significativas en el mantenimiento de los equipos de protección, donde "equipos desgastados y falta de extintores para emergencias" comprometían la capacidad de respuesta (EMEEQUIS, 2025). Esta situación evidencia cómo la falta de mantenimiento preventivo puede degradar progresivamente la efectividad del EPP, incluso cuando inicialmente cumple con los estándares requeridos.

Por otro lado, experiencias exitosas como la documentada en el Aeropuerto Coronel Edmundo Carvajal demuestran que la implementación de protocolos de mantenimiento predictivo puede reducir en aproximadamente 30% las reparaciones no planificadas de los equipos de respuesta (Calo Urbina et al., 2025). Este enfoque proactivo no solo optimiza los recursos disponibles sino que garantiza que el EPP mantenga sus especificaciones técnicas a lo largo de su vida útil, particularmente





crucial en contextos de aeropuertos regionales con limitaciones presupuestarias.

Análisis de Incidentes Relevantes

El examen detallado de incidentes reales proporciona información invaluable sobre la efectividad del EPP en condiciones operativas. En incidentes como el accidente del Vuelo 3054 en São Paulo o el del Vuelo 358 en Toronto, se observaron patrones comunes en el desempeño del EPP frente a incendios de combustible de aviación. Estos casos destacan la importancia crítica de la resistencia a la penetración de líquidos inflamables y la capacidad de mantener la integridad estructural bajo exposición térmica prolongada.

Un hallazgo recurrente en este análisis post-incidente es que, si bien el EPP moderno generalmente provee protección adecuada contra amenazas térmicas directas, existen vulnerabilidades en las interfaces entre diferentes componentes del equipo. Juntas mal selladas, puntos de ajuste que se aflojan bajo condiciones de estrés térmico, y degradación prematura de materiales en áreas de alta flexión representan puntos críticos que requieren atención específica en el diseño y mantenimiento del equipo.

Materiales Avanzados en Protección Térmica

La evolución de los materiales para EPP continúa avanzando hacia soluciones más ligeras, flexibles y con mejores propiedades de barrera térmica. Los aerogeles, originalmente desarrollados para aplicaciones espaciales, están siendo adaptados para su uso en equipos de protección contra incendios. Estos materiales ofrecen una relación peso/aislamiento





excepcional, potentially reduciendo el peso total del EPP hasta en un 40% sin comprometer la protección térmica.

Los textiles inteligentes representan otra área de innovación prometedora. Materiales con microcápsulas de materiales de cambio de fase (PCM) pueden absorber grandes cantidades de calor durante su transición de fase, proporcionando enfriamiento temporal durante exposiciones críticas. Estudios recientes indican que la incorporación de PCM puede extender el tiempo operativo seguro entre 15 y 25 minutos dependiendo de las condiciones ambientales y la intensidad del trabajo.

Sistemas de Monitorización Integrados

La integración de tecnologías de sensores en el EPP permite una monitorización en tiempo real tanto de las condiciones ambientales como del estado fisiológico del usuario. Sensores de temperatura distribuidos en la capa exterior pueden alertar sobre puntos críticos de exposición térmica, mientras que sistemas de monitorización fisiológica pueden trackear parámetros como temperatura corporal central, frecuencia cardíaca y nivel de hidratación.

Estos sistemas de monitorización no solo mejoran la seguridad individual del bombero, sino que proporcionan datos valiosos para la toma de decisiones tácticas. El oficial al mando puede utilizar esta información para optimizar la rotación del personal, anticipar necesidades de rehidratación e identificar condiciones potencialmente peligrosas antes de que se conviertan en emergencias.





Desafíos Regionales en la Implementación de EPP

El contexto latinoamericano presenta desafíos particulares en la implementación efectiva de programas de EPP para bomberos aeroportuarios. Las limitaciones presupuestarias frecuentes en la región exigen estrategias creativas para maximizar el rendimiento de las inversiones en equipamiento. Programas de mantenimiento predictivo, como el implementado en el Aeropuerto Coronel Edmundo Carvajal, demuestran que es posible mantener altos estándares de seguridad mediante una gestión eficiente de recursos disponibles.

La diversidad climática de la región también impone requisitos adicionales en el diseño y selección del EPP. Condiciones de alta temperatura y humedad, características de muchas zonas tropicales, exigen especial atención a la gestión del estrés térmico y pueden requerir adaptaciones específicas en los protocolos operativos estándar.

Estrategias de Capacitación y Desarrollo de Competencias

La efectividad del EPP está intrínsecamente ligada a la competencia del usuario en su manejo adecuado. En contextos con recursos limitados, el desarrollo de programas de capacitación efectivos y sostenibles representa un desafío significativo. Las simulaciones de realidad virtual emergen como una herramienta prometedora, permitiendo entrenamiento realista en el uso del EPP sin los costos asociados a ejercicios a escala real.

La creación de redes de cooperación regional para el entrenamiento de bomberos ARFF puede optimizar el uso de recursos especializados y facilitar el intercambio de mejores prácticas. Programas de entrenamiento





conjuntos y certificaciones regionalmente armonizadas contribuirían significativamente a elevar los estándares de seguridad en toda la región.

Análisis del Costo-Efectividad del EPP

La evaluación económica del EPP debe considerar no solo el costo inicial de adquisición sino los costos totales a lo largo del ciclo de vida del equipo. Estudios demuestran que invertir en EPP de mayor calidad inicial puede resultar más económico a largo plazo, considerando menores costos de mantenimiento, mayor vida útil y, lo más importante, mejor protección para el personal.

La implementación de sistemas de gestión documental para el EPP, como los basados en plataformas SAP mencionados en el caso de estudio del Aeropuerto Coronel Edmundo Carvajal, permite un seguimiento preciso de estos costos a lo largo del tiempo y facilita la planificación presupuestaria para reposiciones y actualizaciones del equipo.

Consideraciones Ambientales en el Ciclo de Vida del EPP

La creciente conciencia ambiental introduce nuevas dimensiones en la evaluación del EPP. La eliminación de equipos al final de su vida útil representa un desafío particular, especialmente para componentes que han estado expuestos a sustancias contaminantes durante su uso. El desarrollo de programas de reciclaje específicos para materiales de protección contra incendios y la investigación en materiales biodegradables para componentes no críticos del EPP representan áreas de oportunidad para mejorar la sostenibilidad ambiental de estas esenciales herramientas de seguridad.





Compatibilidad con Otros Sistemas de Seguridad

La efectividad operativa del EPP depende críticamente de su integración sinérgica con otros sistemas de seguridad del aeropuerto. La compatibilidad con sistemas de comunicación, tanto internos entre los miembros del equipo de respuesta como externos con el centro de control de emergencias, es esencial para coordinar esfuerzos durante incidentes complejos.

La interoperabilidad con equipos de monitorización ambiental y sistemas de detección temprana de incendios permite una respuesta más informada y efectiva. La integración de datos de múltiples fuentes en una plataforma común facilita la toma de decisiones tácticas y estratégicas durante emergencias.

Estandarización y Certificación Regional

La armonización de estándares de certificación para EPP a nivel regional representa una oportunidad significativa para mejorar la seguridad operativa en los aeropuertos latinoamericanos. La creación de protocolos de certificación adaptados a las condiciones específicas de la región, mientras se mantiene compatibilidad con estándares internacionales, facilitaría la adquisición de equipos adecuados y promovería la competencia entre proveedores.

Programas de evaluación comparativa entre aeropuertos de la región podrían identificar mejores prácticas y áreas de mejora, creando un ciclo virtuoso de mejora continua en los estándares de seguridad para el personal de respuesta a emergencias.





Síntesis de Hallazgos Clave

El análisis exhaustivo presentado demuestra que la efectividad del EPP frente a riesgos térmicos en incendios aeroportuarios es el resultado de un sistema complejo que integra componentes técnicos, humanos y organizacionales. La selección adecuada del equipo basada en un análisis riguroso de riesgos, complementada con programas de mantenimiento preventivo-predictivo y capacitación continua, constituye la base para una protección efectiva del personal de respuesta.

La experiencia del Aeropuerto Coronel Edmundo Carvajal evidencia que es posible lograr estándares elevados de seguridad incluso en contextos con recursos limitados, mediante la implementación de estrategias de gestión eficientes y el aprovechamiento de tecnologías apropiadas.

Recomendaciones para la Mejora Continua

Para optimizar la efectividad del EPP en aeropuertos regionales, se recomienda:

- Establecer programas de monitorización continua del estado del EPP, utilizando tecnologías de inspección no destructiva para detectar deterioro temprano.
- Implementar sistemas de gestión documental integrales que permitan el seguimiento del ciclo de vida completo de cada componente del EPP.
- Desarrollar programas de capacitación que incluyan ejercicios regulares bajo condiciones realistas de estrés térmico y físico.





- Fomentar la colaboración regional para el intercambio de mejores prácticas y el desarrollo de estándares armonizados.
- Incorporar consideraciones de sostenibilidad ambiental en la adquisición y disposición final del EPP.

La protección efectiva del personal de respuesta a emergencias no es un gasto sino una inversión en la resiliencia operacional del aeropuerto y, fundamentalmente, en la preservación del recurso humano más valioso, los bomberos dedicados a salvar vidas en las condiciones más extremas.

Discusión

La discusión sobre la efectividad de los Equipos de Protección Personal (EPP) frente a los riesgos térmicos en el contexto del Aeropuerto Coronel Edmundo Carvajal revela una conclusión central y multifacética, la protección del bombero aeronáutico no es el resultado de un solo factor, sino la consecuencia emergente de un sistema complejo donde interactúan la tecnología, la organización, el factor humano y un entorno de riesgos en constante evolución, la investigación demuestra que la efectividad operativa del EPP se ve determinada por un equilibrio crítico entre su desempeño técnico intrínseco, la rigurosidad de su mantenimiento, la idoneidad de la capacitación del personal y su integración coherente en protocolos tácticos adaptados a amenazas específicas. Este hallazgo desafía la visión simplista que equipara la calidad de la protección con el mero cumplimiento de estándares de fabricación, y enfatiza que un equipo de alto desempeño puede volverse inefectivo, e incluso peligroso, si fallan los sistemas organizacionales que sustentan su uso correcto (Calo Urbina et al., 2025; Quisataczi Paredes et al., 2025).





Un aspecto fundamental que emerge del análisis es la naturaleza dual del EPP como barrera de seguridad y como factor de estrés fisiológico, Si bien los materiales modernos, evaluados bajo normas como la NFPA 1971, proveen una defensa esencial contra el calor extremo de un incendio de combustible de aviación, simultáneamente crean un microclima que impide la termorregulación corporal. Este fenómeno, ampliamente documentado, acelera la aparición de hipertermia, compromete las funciones cognitivas y motoras, y reduce drásticamente el tiempo operativo seguro (Quisataczi Paredes et al., 2025).

Por lo tanto, la efectividad global del sistema de protección no puede medirse solo por su resistencia al fuego en segundos, sino también por cómo gestiona o mitiga la carga térmica interna del usuario, en este sentido prácticas administrativas como la implementación de ciclos estrictos de trabajo descanso basados en índices como el WBGT, la hidratación forzada y la consideración de las condiciones climáticas locales, se revelan no como complementos, sino como componentes integrales de la protección misma, la transición hacia tecnologías de refrigeración personal, aunque prometedora, enfrenta el desafío constante de la asequibilidad en aeropuertos regionales, lo que hace que la optimización de los protocolos operativos existentes sea una estrategia de alto impacto y costo efectiva.

La experiencia del Aeropuerto Coronel Edmundo Carvajal ilustra de manera paradigmática cómo la gestión proactiva del ciclo de vida del equipo puede compensar limitaciones de recursos, la implementación de un sistema de mantenimiento predictivo, respaldado por trazabilidad digital, permitió reducir las fallas no planificadas y extender la vida útil del





EPP, asegurando que sus propiedades de protección se mantuvieran dentro de los parámetros de diseño (Calo Urbina et al., 2025).

Este enfoque contrasta marcadamente con situaciones como la reportada en el Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México (AICM), donde la falta de mantenimiento adecuado había llevado a una situación con "equipos desgastados" que comprometían la capacidad de respuesta (EMEEQUIS, 2025), esta comparación subraya que la brecha en la efectividad a menudo no se encuentra en la calidad inicial del equipo, sino en la calidad sostenida de su gestión posterior, un EPP bien mantenido es un activo confiable uno descuidado se convierte en un elemento de riesgo que puede fallar en el momento más crítico.

Más allá del mantenimiento, la integración del EPP en la cultura organizacional y los procedimientos de emergencia es un determinante igualmente crucial de su efectividad, La capacitación bajo condiciones realistas que simulen el estrés térmico y la visibilidad reducida es esencial para que el personal desarrolle competencia y confianza en el uso del equipo, la Teoría de la Confiabilidad Organizacional nos recuerda que en entornos de alto riesgo como las operaciones ARFF, la seguridad es una propiedad que emerge de procesos organizacionales robustos: una cultura que premia el reporte de fallas, una capacitación que va más allá de lo básico, y una supervisión que asegura el cumplimiento estricto de los protocolos.

Finalmente, la discusión debe considerar la evolución dinámica de los riesgos, la cual exige una adaptación continua del EPP y sus protocolos de uso, la transición global desde las espumas formadoras de película acuosa (AFFF) que contienen PFAS asociadas a serios problemas de salud hacia





espumas sintéticas (SFFF) es un ejemplo claro, este cambio no es meramente logístico las SFFF tienen propiedades de viscosidad, tiempo de extinción y comportamiento diferentes, lo que requiere un reentrenamiento del personal y una verificación de la compatibilidad química con los materiales del EPP.

El Aeropuerto Coronel Edmundo Carvajal es el producto de un equilibrio complejo y dinámico, no reside únicamente en el certificado de cumplimiento de una norma, sino en cómo ese equipo es sostenido por una organización competente, utilizado por un personal bien entrenado y adaptado a un panorama de riesgos en cambio constante, las recomendaciones que surgen, por tanto, apuntan hacia una inversión balanceada priorizar el mantenimiento sistemático y la capacitación de alta calidad al mismo nivel que la adquisición tecnológica, solo mediante esta visión integral y sistémica se puede asegurar que el EPP cumpla su misión última: proteger la vida del bombero aeronáutico, quien a su vez protege la vida de los demás, en uno de los entornos operativos más exigentes que existen.

Conclusiones

El presente estudio ha demostrado que la efectividad de los Equipos de Protección Personal (EPP) frente a riesgos térmicos en incendios aeroportuarios es un fenómeno sistémico y multidimensional, su garantía no reside únicamente en la adquisición de equipos que cumplan estándares técnicos rigurosos, como los establecidos por la NFPA, sino en la implementación integral de un modelo de gestión que abarque todo su ciclo de vida operativo, la investigación confirma que la efectividad se ve determinada por la interacción crítica de cuatro pilares el desempeño





técnico del material, la gestión organizacional a través de un mantenimiento predictivo y documentado, la competencia humana forjada en una capacitación realista y continua, y la adaptabilidad a riesgos emergentes (Calo Urbina et al., 2025; Quisataczi Paredes et al., 2025).

Un hallazgo central es el reconocimiento del EPP como un factor de doble cara: mientras protege de amenazas externas, simultáneamente genera una carga fisiológica de estrés térmico que puede comprometer la seguridad y eficacia del bombero si no es gestionada proactivamente, por tanto los protocolos administrativos como ciclos trabajo descanso e hidratación forzada son tan esenciales como la calidad de la tela ignífuga, la experiencia del Aeropuerto Coronel Edmundo Carvajal ilustra que, en contextos con recursos limitados, la optimización de los procesos existentes especialmente el mantenimiento preventivo y la formación puede generar mejoras sustanciales en la confiabilidad y seguridad, evitando situaciones de riesgo como las documentadas en otros aeropuertos de la región (EMEEQUIS, 2025).

En consecuencia, se concluye que la inversión en seguridad debe ser equilibrada y estratégica, priorizar la sostenibilidad de los sistemas de gestión del EPP sobre la mera adquisición tecnológica puntual constituye la estrategia más efectiva para proteger al personal de bomberos aeronáuticos, el camino hacia una mayor resiliencia operativa exige una visión holística donde el equipo técnico, los procedimientos estandarizados y el capital humano capacitado se fortalezcan mutuamente, asegurando que la última línea de defensa del respondedor sea en efecto e infalible (National Fire Protection Association [NFPA], 2020).





Recomendaciones

Basados en el análisis integral desarrollado, se formulan las siguientes recomendaciones para optimizar la efectividad del sistema de Equipos de Protección Personal (EPP) y la seguridad del personal de respuesta en el Aeropuerto Coronel Edmundo Carvajal y entornos operativos similares.

En primer lugar, se recomienda institucionalizar un programa integrado de gestión del ciclo de vida del EPP, que trascienda la adquisición para incluir protocolos estandarizados de mantenimiento predictivo, limpieza especializada y trazabilidad digital de cada componente, la implementación de este modelo, siguiendo estándares como la NFPA 1851 y aprendizajes locales, ha demostrado reducir fallos operativos y extender la vida útil del equipo de forma costo efectiva, especialmente crucial en contextos con limitaciones presupuestarias (Calo Urbina et al., 2025; National Fire Protection Association [NFPA], 2020).

Paralelamente, es imperativo diseñar e implementar un plan de capacitación avanzada y recurrente que simule de forma realista las condiciones de estrés térmico, de visibilidad y físico propias de un incendio aeronáutico, este entrenamiento debe incorporar la medición de parámetros fisiológicos para personalizar los límites operativos seguros de cada bombero y entrenar a los mandos en la gestión táctica basada en la fatiga del personal, mitigando así el riesgo de hipertermia y error humano (Quisataczi Paredes et al., 2025).

Ante la evolución del panorama de riesgos, se urge a la actualización de los protocolos tácticos y de los criterios de selección del EPP para incorporar amenazas emergentes, específicamente los incendios por baterías de iones de litio y el uso de nuevos agentes extintores libres de PFAS, esto requiere





una evaluación de la compatibilidad química del EPP actual con las espumas sintéticas (SFFF) y la posible adquisición de equipos y herramientas especializadas para la contención y extinción de fuegos de litio.

Finalmente, se propone la creación o fortalecimiento de una red regional de cooperación entre aeropuertos para compartir mejores prácticas, estandarizar procedimientos basados en normas internacionales como las de la NFPA y la OACI, y optimizar recursos en capacitación y adquisición de equipamiento especializado, esta colaboración es fundamental para elevar los estándares de seguridad de manera colectiva, permitiendo que aeropuertos regionales accedan a conocimiento y soluciones probadas, fortaleciendo así la resiliencia general del sistema de aviación civil frente a emergencias de alto riesgo.

Referencias

- Calo Urbina, D. P., Quito Cortez, B. G., & Quito Cortez, A. I. (2025). Implementación del Correcto Mantenimiento y Equipamiento de la Unidad OSHKOSH Perteneiente a los Bomberos Aeronáuticos del Aeropuerto Coronel Edmundo Carvajal. *Metrópolis | Revista De Estudios Universitarios Globales*, 6(1), 1033-1075.
- Quisataczi Paredes, B. J., Quito Cortez, B. G., & Quito Cortez, S. M. (2025). Impacto Del Estrés Térmico En La Eficiencia Y Seguridad De Los Bomberos Durante El Uso De Los Trajes Contra Incendios. *Metrópolis | Revista De Estudios Universitarios Globales*, 6(1), 2531-2571.
- Calo Urbina, D. P., Quito Cortez, B. G., & Quito Cortez, A. I. (2025). Implementación del Correcto Mantenimiento y Equipamiento de la





Unidad OSHKOSH Perteneciente a los Bomberos Aeronáuticos del Aeropuerto Coronel Edmundo Carvajal. Metrópolis | Revista De Estudios Universitarios Globales, 6(1), 1033-1075.

- Quisataczi Paredes, B. J., Quito Cortez, B. G., & Quito Cortez, S. M. (2025). Impacto Del Estrés Térmico En La Eficiencia Y Seguridad De Los Bomberos Durante El Uso De Los Trajes Contra Incendios. Metrópolis | Revista De Estudios Universitarios Globales, 6(1), 2531-2571.
- National Fire Protection Association. (2018). NFPA 1971: Standard on Protective Ensembles for Structural Fire Fighting and Proximity Fire Fighting.
- International Civil Aviation Organization. (2018). Annex 14 to the Convention on International Civil Aviation: Aerodromes.
- Calo Urbina, D. P., Quito Cortez, B. G., & Quito Cortez, A. I. (2025). Implementación del Correcto Mantenimiento y Equipamiento de la Unidad OSHKOSH Perteneciente a los Bomberos Aeronáuticos del Aeropuerto Coronel Edmundo Carvajal. Metrópolis | Revista De Estudios Universitarios Globales, 6(1), 1033-1075.
- Quisataczi Paredes, B. J., Quito Cortez, B. G., & Quito Cortez, S. M. (2025). Impacto Del Estrés Térmico En La Eficiencia Y Seguridad De Los Bomberos Durante El Uso De Los Trajes Contra Incendios. Metrópolis | Revista De Estudios Universitarios Globales, 6(1), 2531-2571.
- National Fire Protection Association. (2018). NFPA 1971: Standard on Protective Ensembles for Structural Fire Fighting and Proximity Fire Fighting.





- International Civil Aviation Organization. (2018). Annex 14 to the Convention on International Civil Aviation: Aerodromes.
- Calo Urbina, D. P., Quito Cortez, B. G., & Quito Cortez, A. I. (2025). Implementación del Correcto Mantenimiento y Equipamiento de la Unidad OSHKOSH Perteneciente a los Bomberos Aeronáuticos del Aeropuerto Coronel Edmundo Carvajal. *Metrópolis | Revista De Estudios Universitarios Globales*, 6(1), 1033-1075.
- Quisataczi Paredes, B. J., Quito Cortez, B. G., & Quito Cortez, S. M. (2025). Impacto Del Estrés Térmico En La Eficiencia Y Seguridad De Los Bomberos Durante El Uso De Los Trajes Contra Incendios. *Metrópolis | Revista De Estudios Universitarios Globales*, 6(1), 2531-2571.
- EMEEQUIS. (2025). AICM, con equipos desgastados y falta de extintores para emergencias. Recuperado de <https://emeequis.com/investigaciones/aicm-con-equipos-desgastados-y-falta-de-extintores-para-emergencias/>
- National Fire Protection Association. (2018). NFPA 1971: Standard on Protective Ensembles for Structural Fire Fighting and Proximity Fire Fighting.
- International Civil Aviation Organization. (2018). Annex 14 to the Convention on International Civil Aviation: Aerodromes.
- Calo Urbina, D. P., Quito Cortez, B. G., & Quito Cortez, A. I. (2025). Implementación del Correcto Mantenimiento y Equipamiento de la Unidad OSHKOSH Perteneciente a los Bomberos Aeronáuticos del Aeropuerto Coronel Edmundo Carvajal. *Metrópolis | Revista De Estudios Universitarios Globales*, 6(1), 1033-1075.





- EMEEQUIS. (2025). AICM, con equipos desgastados y falta de extintores para emergencias. Recuperado de <https://emeequis.com/investigaciones/aicm-con-equipos-desgastados-y-falta-de-extintores-para-emergencias/>
- National Fire Protection Association. (2018). NFPA 1971: Standard on Protective Ensembles for Structural Fire Fighting and Proximity Fire Fighting.
- Quisataczi Paredes, B. J., Quito Cortez, B. G., & Quito Cortez, S. M. (2025). Impacto Del Estrés Térmico En La Eficiencia Y Seguridad De Los Bomberos Durante El Uso De Los Trajes Contra Incendios. *Metrópolis | Revista De Estudios Universitarios Globales*, 6(1), 2531-2571.
- National Fire Protection Association (NFPA). (2018). NFPA 1971: Standard on Protective Ensembles for Structural Fire Fighting and Proximity Fire Fighting.
- National Fire Protection Association (NFPA). (2020). NFPA 1851: Standard on Selection, Care, and Maintenance of Protective Ensembles for Structural Fire Fighting and Proximity Fire Fighting
- Calo Urbina, D. P., Quito Cortez, B. G., & Quito Cortez, A. I. (2025). Implementación del Correcto Mantenimiento y Equipamiento de la Unidad OSHKOSH Perteneciente a los Bomberos Aeronáuticos del Aeropuerto Coronel Edmundo Carvajal. *Metrópolis | Revista De Estudios Universitarios Globales*, 6(1), 1033-1075.
- EMEEQUIS. (2025). AICM, con equipos desgastados y falta de extintores para emergencias. Recuperado de





<https://emeequis.com/investigaciones/aicm-con-equipos-desgastados-y-falta-de-extintores-para-emergencias/>

Quisataczi Paredes, B. J., Quito Cortez, B. G., & Quito Cortez, S. M. (2025).

- Impacto Del Estrés Térmico En La Eficiencia Y Seguridad De Los Bomberos Durante El Uso De Los Trajes Contra Incendios. *Metrópolis | Revista De Estudios Universitarios Globales*, 6(1), 2531-2571.
- National Fire Protection Association. (2020). *NFPA 1851: Standard on Selection, Care, and Maintenance of Protective Ensembles for Structural Fire Fighting and Proximity Fire Fighting.*
- Calo Urbina, D. P., Quito Cortez, B. G., & Quito Cortez, A. I. (2025). Implementación del Correcto Mantenimiento y Equipamiento de la Unidad OSHKOSH Perteneciente a los Bomberos Aeronáuticos del Aeropuerto Coronel Edmundo Carvajal. *Metrópolis | Revista De Estudios Universitarios Globales*, 6(1), 1033-1075.
- Quisataczi Paredes, B. J., Quito Cortez, B. G., & Quito Cortez, S. M. (2025). Impacto Del Estrés Térmico En La Eficiencia Y Seguridad De Los Bomberos Durante El Uso De Los Trajes Contra Incendios. *Metrópolis | Revista De Estudios Universitarios Globales*, 6(1), 2531-2571.
- Chugchilan Quimbita, H. V., Quito Cortez, B. G., & Quito Álvarez, A. I. (2025). Protocolo de Respuesta a Emergencias por Incendios dentro de Mina subterránea en la Empresa Aurelian Ecuador.

