



7º CONGRESO FORESTAL ESPAÑOL

**Gestión del monte: servicios
ambientales y bioeconomía**

26 - 30 junio 2017 | **Plasencia**
Cáceres, Extremadura

7CFE01-371

Edita: Sociedad Española de Ciencias Forestales
Plasencia. Cáceres, Extremadura. 26-30 junio 2017
ISBN 978-84-941695-2-6

© Sociedad Española de Ciencias Forestales

Metodología y resultados sobre los efectos del calor radiante en el Personal Especialista en Extinción de Incendios Forestales (PEEIF)

LÓPEZ-SATUÉ, J.¹, CARBALLO LEYENDA, A.B.², AGUIRRE BRIONES, F.¹, GÓMEZ MOLINO, R.², CARRILLO PATIÑO, A.³, VILLA VICENTE, J.G.²

¹ Gerencia de Incendios Forestales. Subdirección de Incendios y Emergencias. Grupo TRAGSA.

² Departamento de Educación Física y Deportiva. Instituto de Biomedicina (IBIOMED). Universidad de León.

³ Gerencia de Tecnología de la Información y Fondos Europeos. Subdirección de Soporte Técnico e Innovación. Grupo TRAGSA.

Resumen

Durante la extinción de un incendio forestal, los trabajadores, debido al esfuerzo físico realizado, producen un incremento del calor metabólico. Al mismo tiempo, deben soportar el calor proveniente de la radiación térmica de las llamas y la convección de los gases calientes (aire y humo), ante lo cual es obligatorio el uso de equipos de protección individual, que contemplen ambas funciones. Ante la inexistencia de estudios que aborden cómo interaccionan los equipos de protección tanto con el medio que les rodea como con los trabajadores que los portan, durante las últimas anualidades se ha procedido a analizar tanto en laboratorio (pruebas de esfuerzo y test con termomán) como en incendios forestales reales (registro de flujos de calor incidentes) el comportamiento de los tejidos ignífugos y su relación con la eficiencia termorreguladora. En este sentido, se han alcanzado resultados relativos tanto al calor recibido en la superficie del tejido (kW/m²) como el transferido al interior del mismo (% de atenuación) así como del comportamiento de la temperatura corporal. Dicho conocimiento es fundamental, ya que puede permitir adoptar medidas y estrategias dirigidas a potenciar la ergonomía y la eficiencia de los equipos de protección individual, así como los procedimientos de trabajo. Los trabajos presentados han sido realizados en el ámbito del proyecto Advanced Forest Fire Fighting (AF3), financiado por el Séptimo Programa Marco (7PM) bajo el acuerdo de subvención GA n° 607276.

Palabras clave

Estrés térmico, temperatura, radiación, eficiencia, seguridad.

1. Introducción

El estrés térmico corresponde a la carga neta de calor a la que los trabajadores están expuestos y que resulta de la contribución combinada de las condiciones ambientales del lugar donde trabajan, la actividad física que realizan y las características de la ropa que llevan (MONROY y LUNA, 2011; SMITH & PETRUZZELLO, 1997). Entre los factores que se miden y que determinan el estrés térmico potencial se incluyen: la temperatura del aire, la humedad relativa, la velocidad del aire, la radiación, la actividad metabólica y el tipo de ropa (emisividad y capacidad evaporativa). La medición de estos factores permite determinar las demandas térmicas internas y externas que dan lugar a la termorregulación del cuerpo humano.

La sobrecarga térmica hace referencia a la respuesta fisiológica del cuerpo humano al estrés térmico y corresponde al coste que le supone al cuerpo humano el ajuste necesario para mantener la temperatura interna en el rango adecuado (MONROY y LUNA, 2011; DE BOS et al., 2004). Los parámetros que permiten controlar y determinar la sobrecarga térmica son: la temperatura corporal, la frecuencia cardíaca y la tasa de sudoración. La sobrecarga térmica no se puede predecir de manera fiable a partir solamente del estudio del estrés térmico ya que las mediciones del ambiente térmico no permiten determinar con precisión cuál será la respuesta fisiológica que sufrirá el individuo. Esto es debido a que la sobrecarga térmica depende de factores propios de cada persona

que incluso puede variar en el tiempo, por lo que estos factores o características personales son los que determinan la capacidad fisiológica de respuesta al calor. Asimismo, resulta importantísimo, en la sobrecarga térmica, las propiedades intrínsecas de los tejidos. Dentro de dichas propiedades y en el ámbito de los incendios forestales, se deben resaltar:

- Aislamiento térmico It $^{\circ}\text{Cm}^2/\text{W}$, $1 \text{ clo} = 0,155 \text{ }^{\circ}\text{C m}^2/\text{W}$: resistencia de la ropa a la entrada y salida de calor seco. Depende de las propiedades de las fibras y materiales, su gramaje, etc., así como su construcción formando capas de aire inmóvil en contacto con la piel y tejido (UNE-EN-ISO 9920:2009).

- Resistencia evaporativa R_{et} (m^2/W): resistencia a la difusión del sudor evaporado de la piel húmeda al ambiente.

Estrés Térmico en Incendios Forestales

Durante la extinción de un incendio forestal, el Personal Especialista en Extinción de Incendios Forestales (PEEIF) debe soportar un incremento del calor producido por su propio metabolismo debido al trabajo desempeñado, además de soportar el calor proveniente de la radiación térmica de las llamas y la convección de los gases calientes (aire y humo). Dependiendo de la localización y posición del PEEIF respecto al frente de llamas y de las propiedades de su ropa de protección, los diferentes componentes de la transferencia de calor (i.e., radiación, convección o en menor medida conducción) se combinarán para producir una ganancia o pérdida de calor (RAJ, 2008). Normalmente en fuegos reales, esta combinación resulta en una ganancia neta de calor por el cuerpo humano (BUDD et al., 1997; RAIMUNDO & FIGUEIREDO, 2009).

En términos de exposición al calor, las condiciones de trabajo en incendios forestales no son tan extremas como las identificadas en incendios de estructura, ya que ocurren a cielo abierto y la carga energética aportada por las llamas se ve rápidamente dispersada en la atmósfera (ARNALDOS et al., 2004). BUDD et al. (1997) describieron las condiciones ambientales que soporta el PEEIF durante la realización de línea de defensa en quemas experimentales en Australia. Los valores obtenidos fueron muy variables, la temperatura ambiental promedio fue de $29 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ($19\text{-}35^{\circ}\text{C}$). La temperatura radiante (i.e., flujo de calor) analizada fue de $66 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ($33\text{-}96 \text{ }^{\circ}\text{C}$) con un porcentaje de humedad menor del 20% y una velocidad del viento de entre $7\text{-}72 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$. La carga de calor radiante medida a través de un radiómetro colocado en un trípode al lado del PEEIF, arrojó valores de entre 0.7 y $8.6 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$, siendo el valor más frecuente $1.6 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$ (BUDD et al., 1997). Estos valores concuerdan con los aportados por otros estudios que establecen que el rango de radiación durante la extinción de incendios forestales oscila entre 1 y $8 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$ (ISO, 2006).

Ante estos hechos, la ropa usada en la extinción de incendios forestales debe proteger al PEEIF del flujo de calor externo. El aislamiento térmico que la ropa ofrece al intercambio de calor dependerá del espesor de las capas de tejido y de la naturaleza del mismo (GOLDMAN, 1990). El Equipo de Protección Individual (EPI) utilizado en los incendios forestales alcanza un aislamiento térmico de $1,21 \text{ Clo}$ ($\text{m}^2\cdot\text{K}\cdot\text{W}^{-1}$) (RAIMUNDO & FIGUEIREDO, 2009) frente a los 3 Clo del EPI de los bomberos de estructura (GOLDMAN, 1990; TAYLOR, 2006). Ello provoca que el EPI de estos últimos dificulte más el intercambio de calor y sea más voluminoso y pesado respecto al empleado en incendios forestales.

El trabajo físico desarrollado por el PEEIF provoca una elevada cantidad de calor metabólico que debe ser eliminado para mantener el equilibrio térmico. Por otro lado, el aislamiento del EPI puede reducir la eliminación efectiva de calor hacia el medio (HOLMER, 2006) al limitar la evaporación del sudor (HAVENITH, 1999). Esta dificultad para eliminar el calor produce un mayor incremento de la temperatura corporal y un aumento de la sudoración, que no llega a evaporarse, en un intento de aumentar la eficiencia evaporativa. HAVENITH et al. (1999). y APUD et al. (2002) informaron que el 40% del sudor producido por el PEEIF se queda retenido en la ropa. Por ello, el

contenido de humedad en el interior del traje de protección alcanza valores en torno al 80-100% de humedad relativa (LAWSON et al., 2004; HEUS et al., 2005). La saturación de humedad del EPI afecta a sus características térmicas, incrementando la tasa de absorción del calor ambiental (LAWSON et al., 2004), y aumentando el riesgo de sufrir quemaduras por escaldadura (ROSSI, 2003). La reducción de la eficiencia evaporativa conduce a una ganancia constante de calor corporal que no puede ser mantenida en el tiempo, limitando el tiempo de tolerancia al trabajo (CHEUNG et al., 2000; McLELLAN & SELKIRK, 2004). Por lo tanto, el EPI además de proteger al PEEIF del ambiente exterior debe permitir una buena eliminación del calor corporal generado (BAKER et al., 2000; BUDD, 2001; EGLIN, 2007).

2. Objetivos

El objetivo principal del presente trabajo es analizar tanto en campo como en laboratorio el papel que desempeña el Equipo de Protección Individual en la termorregulación y en la seguridad del PEEIF. Se plantean como objetivos específicos:

- Analizar en incendios forestales reales el flujo de calor soportado y calcular el porcentaje de atenuación del mismo transferido al interior del EPI.
- Valorar en laboratorio el papel del EPI en la termorregulación del PEEIF.
- Evaluar en termomán el riesgo de sufrir quemaduras así como el grado y posición de las mismas portando el EPI en diferentes situaciones de exposición térmica.

3. Metodología

A continuación se presentan las metodologías para los 3 objetivos descritos en el apartado anterior:

Análisis del flujo de calor soportado en incendios forestales reales

Durante la anualidad 2015, 4 trabajadores (2 integrantes de la BRIF de Tabuyo del Monte y 2 integrantes de la ELIF de Sahechores de Rueda) han sido monitorizados en los 5 incendios a los que acudieron. Durante la extinción de dichos incendios, se registró el tipo de labor que hicieron, se georeferenciaron todas las acciones, se filmaron en tiempo real y se monitorizaron las variables del estrés térmico: frecuencia cardíaca (FC), temperatura central (TC), temperatura de la piel (Tp), flujo de calor (HF) y tasa de sudoración (S). La FC se registró cada 5 segundos. Para ello, cada trabajador llevó una banda personal dotada de sensores de medida de FC ajustada al pecho (EQ02 Sensor Belt, Equivital, Hidalgo Lt, Cambridge, UK). La temperatura corporal fue registrada continuamente (cada 5 s) usando una cápsula de temperatura intestinal JonahTM (VitalSense, Mini Mitter Co., Inc, Bend, OR, USA) previamente validada (McKENZIE & OSGOOD, 2004), ingerida antes de la salida a incendio. La temperatura de la piel se registró empleando parches dérmicos adhesivos (VitalSense, Mini Mitter Co., Inc, Bend, OR, USA) colocados en el pecho. Los datos de temperatura gastrointestinal, frecuencia cardíaca y temperatura de la piel fueron registrados empleando los diferentes canales de adquisición del Equivital LifeMonitor EQ02 (Hidalgo Lt, Cambridge, UK) que cada trabajador portó acoplado a directamente a la banda pectoral (Figura 1).

Para analizar el flujo de calor y la temperatura a la que se ven expuestos durante de la extinción de incendios, se procedió a registrar el flujo de calor total incidente en la cara exterior, el flujo de calor que penetra en el interior del tejido así como el comportamiento de las temperaturas alcanzadas en dichas zonas. Siguiendo las instrucciones del fabricante, los sensores preparados para medir el flujo de calor fueron directamente pegados sobre la superficie del tejido, dos directamente colocados en la superficie exterior del brazo a la altura del pecho y muslo y otros dos a su vez situados en paralelo a los anteriores pero por la parte interna del tejido con la cara receptora dirigida hacia afuera, en el sentido de recepción del mayor flujo de calor esperado. Para la colocación de estos

sensores, fue necesario modificar los monos ignífugos, de modo que se permitiera dicha colocación de modo seguro tanto para el propio dispositivo de medida, como para la comodidad del trabajador que lo portó, siendo esta modificación realizada directamente por la empresa fabricante. Con esta distribución, se pretendía obtener por un lado el flujo de calor que alcanza la superficie del tejido para poder establecer de modo directo la carga de calor que se soporta y por otro lado, el flujo de calor que alcanza la cara interior del tejido para estudiar el factor de atenuación o efecto de apantallamiento del calor incidente en las zonas descritas en la literatura como de máxima exposición al flujo de calor (SONG, 2002). Los sensores de calor, fabricados por la empresa francesa Captec (Lille, France), que se emplearon (Figura 1), son transductores de flujo de calor radiante y convectivo con un campo de visión de 180°, de 20x20 mm² de superficie receptora de color negro, fabricada con resina epoxi altamente absorbente al calor, por lo que actúan como cuerpo negro (absorben el 100% del flujo que les llega). Las características de dichos parches se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Especificaciones técnicas de los 4 sensores de flujo de calor empleados para medir el flujo neto de calor soportado.

PARAMETRO	VALOR
Área	4 cm ²
Rango de trabajo	-180 °C a 250 °C
Rango de entrada	-500 kW·m ⁻² - 500 kW·m ⁻²
Respuesta en el tiempo	0,3 segundos
Sensibilidad	(3,08-3,82)) μV/ W·m ⁻² en el rango de trabajo (Lineal)

Una vez registrado el flujo de calor, se procedió a calcular el factor de atenuación provocado por el tejido ignífugo tanto en la zona del pecho como del muslo siguiendo la ecuación propuesta por RAJ (2008).

$$\% \text{ Atenuación} = \left(\frac{(Q_{\text{int}} - Q_{\text{ext}})}{Q_{\text{ext}}} \right) \cdot 100$$

donde:

- Q_{int} es el flujo de calor recibido por el sensor interno colocado a la altura del pecho W/m².
- Q_{ext} es el flujo de calor recibido por el sensor externo colocado a la altura del pecho W/m².



Figura 1. PEEIF equipado con buzo sensorizado previo a salida a incendio. Detalle de sensor de flujo de calor. Sistema EQUIVITAL de registro de parámetros cardiotermorregulatorios.

Análisis en laboratorio del papel del EPI en la termorregulación del PEEIF

Durante la anualidad 2015 y con objeto de analizar la repercusión de utilizar el buzo ignífugo en la termorregulación, 8 sujetos realizaron de manera aleatoria 2 pruebas submáximas. La primera portando el mono ignífugo a testar (i.e. tejido tipo Karvin verde, con una composición 65% viscosa ignífuga, 30% m-aramida y 5% p-aramida, y un gramaje de $270\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$). La segunda prueba se realizó en ropa deportiva (i.e., pantalón de deporte corto y zapatillas deportivas). Estas 2 pruebas se repitieron en las mismas condiciones, suministrando a los sujetos agua para evitar la deshidratación y favorecer la sudoración. Todos los sujetos realizaron estas pruebas con la misma camiseta de algodón, las mismas zapatillas deportivas y llevando una mochila de 20 kg para simular el peso del equipo que utilizan en los incendios. Todas las pruebas se llevaron a cabo a la misma hora del día (10:00-13:00 h) y bajo las mismas condiciones ambientales ($30\text{ }^{\circ}\text{C}$ y 30% de humedad relativa). Entre cada prueba se dejaron al menos 48 h de recuperación.

El test submáximo a realizar consistió en caminar en el tapiz rodante (h/p/cosmos pulsar, h/p/cosmos sports& medical gmbh, Nussdorf-Traunstein, Germany) a $6\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ y con 1% de pendiente ($\sim 50\%$ del VO_2max) durante 120 min. El protocolo utilizado sigue las recomendaciones sugeridas por trabajos previos (SELKIRK & McLELLAN, 2004) y es similar al utilizado por otros autores para comparar la respuesta termorreguladora de diversos trajes (CHEVRONT et al., 2008). El protocolo experimental consistió en la realización de 6 estadios, el primero de 20 minutos y los restantes de 15 minutos, seguidos de una fase de descanso de 5 minutos, la cual se aprovechó para hidratar a los sujetos. Se administraron $3.3\text{ ml}\cdot\text{kg}^{-1}$ de agua en cada pausa de recuperación ($5\text{ ml}\cdot\text{kg}^{-1}$ de agua cada 30 min) a $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ (ACSM, 2007) con el propósito de que la deshidratación no limite la tasa de sudoración (GONZÁLEZ-ALONSO et al., 1999). En los últimos 5 min anteriores a realizar la pausa de recuperación se registró la FC (Polar Xtrainer Plus, Polar Electro Oy, Finlandia), los gases respiración a respiración (Ergocard, MS Medisoft, Sorinnes, Belgium) y la temperatura corporal por medio de una cápsula intestinal (VitalSenses, Mini Mitter Co., Inc, Bend, OR, USA), ingerida 3-4 h antes del inicio de la prueba. Por último, pesando al sujeto desnudo y cada parte de la ropa antes y después de la prueba (Benchscales, Ohaus UK Ltd, Leicester, UK; precisión $\pm 5\text{ g}$) se calculó la sudoración total de los sujetos y el líquido absorbido por la ropa (BRÖDE et al., 2007). La sudoración de los sujetos fue corregida para la ingesta de líquido durante la prueba, pero no se contempló la pérdida de líquido por la respiración, ya que se asume que ésta puede ser semejante entre todas las pruebas (SAUNDERS et al., 2005). Se calculó el porcentaje de líquido retenido en el traje y la evaporación efectiva (sudoración total - líquido retenido) (BRÖDE et al., 2007).



Figura 2. PEEIF realizando prueba en laboratorio con equipación ignífuga y en ropa deportiva.

Análisis en termomán

Por último, se procedió a testar una equipación ignífuga (i.e. tejido tipo Karvin verde, con una composición 65% viscosa ignífuga, 30% m-aramida y 5% p-aramida y un gramaje de $270\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$) en el termomán (Thermo-Man®, E. I. du Pont de Nemours & Co, Ginebra, Suiza). El protocolo se realizó con el buzo nuevo y con más de 30 lavados. El termomán (Figura 3) es un maniquí de tamaño real equipado con 122 sensores de calor, que se viste con las prendas de prueba y se envuelve totalmente en las llamas generadas por quemadores de gas propano. Esta prueba simula la exposición de una prenda al exceso típico de un combustible ardiendo con temperaturas que llegan a $1.000\text{ }^{\circ}\text{C}$. Predice el comportamiento de protección de la prenda y su integridad contra el calor, las llamas y el fuego durante un incidente de fuego típico.

Los sensores de calor registran el aumento de temperatura en la superficie del maniquí, y un programa de simulación por ordenador calcula:

- el porcentaje previsto de quemaduras de segundo y tercer grado que podría sufrir una persona en condiciones similares.
- La posición de las quemaduras y el porcentaje de las mismas en comparación con el total del cuerpo.
- La evolución de las quemaduras durante el tiempo de medición, lo que en combinación con la edad de la víctima da como resultado las posibilidades de que la persona sobreviva al incidente (en %).

El protocolo empleado para el testado del buzo ignífugo fue:

Flujo de calor de $84\text{kW}/\text{m}^2$ ($2\text{cal}/\text{cm}^2/\text{seg}$) durante un tiempo de exposición a la combustión instantánea de 4 segundos por la siguiente razón: *“La experiencia ha demostrado que unas condiciones de prueba de al menos 4 segundos a $84\text{ kW}/\text{m}^2$ proporcionan la información más completa sobre el rendimiento protector de conjuntos de ropa simples y multicapa. Para las prendas multicapa o para los conjuntos de ropa, puede ser necesario que el tiempo de la prueba aumente hasta 8 segundos”* (fuente: EN ISO 11612).

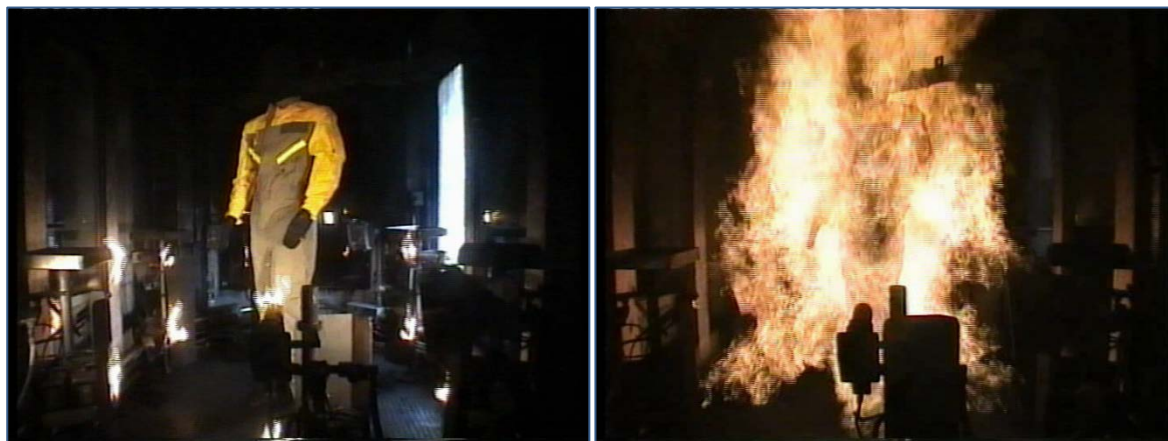


Figura 3. Imagen de las pruebas realizadas con el buzo ignífugo en el Thermomán (Ginebra, Suiza).

4. Resultados y discusión

Análisis del flujo de calor soportado en incendios forestales reales

Los valores de exposición generales obtenidos para los 5 incendios analizados (Tabla 2) muestran que los valores promedio de flujo de calor no son especialmente intensos con valores que no superan los 2kW/m² si bien los datos tienen una alta variabilidad, como muestran los valores de desviación estándar calculada. Los incendios más intensos en promedio fueron el 3 con 1607 (2628) W/m² y 4 con 1139 (1826) W/m² con un valor promedio total de flujo de calor de 890 (455) W/m². Los valores máximos de flujo de calor sí alcanzan cotas significativas de intensidad con valores de 26,27 kW/m² en el incendio 3, 17,32 kW/m² en el incendio 4 o 15,01 kW/m² en 2, aunque estos valores son puntuales, con un valor promedio de los máximos de 16,32 (7,5) kW/m². La duración promedio de los incendios analizados fue de 224 (76) min de los cuales el tiempo de exposición efectiva al flujo de calor fue de promedio 77 (50) min, lo que supone un ratio exposición/extinción del 34%. En este sentido, el incendio con mayor tiempo de exposición efectiva fue el 4 con un 50,1% del tiempo de extinción expuesto a flujo de calor incidente.

Tabla 2. Flujo de calor y duración de la exposición a incendios forestales reales. Valores expresados como media (SD)

Incendio	Flujo calor Medio (W/m ²)	Flujo calor Pico máximo (W/m ²)	Tiempo exposición (min)	Tiempo extinción (min)	Relación (extinción/exposición) (%)
1	626(1363)	14766	66	162	38,4
2	987(2060)	15078	40	302	13,3
3	1607(2628)	26268	28	142	20,9
4	1139(1826)	17315	152	302	50,4
5	446(495)	5394	100	210	47,0
Promedio	890(455)	16325(7445)	77(50)	224(76)	34

Las condiciones referenciadas como peligrosas, se dan a partir de 1 kW/m² y su límite superior es de alrededor de 7 kW/m². Los valores de flujo de calor que se encuentran en este intervalo, son los que normalmente se han descrito durante los incendios forestales en los que se trabaja en ataque directo con herramienta manual (BUDD, 1997). Por debajo de 1 kW/m², no se produce daño alguno, sea cual sea, el tiempo de exposición. Una exposición de 5kW/m² provoca dolor en 20 segundos (ARNALDOS et al., 2004). Varios países de Europa han adoptado 5 kW/m² como criterio para determinar la distancia de seguridad a las personas expuestas al flujo de calor en los incendios. A partir de 7 kW/m² hasta 20 kW/m², las condiciones de extinción se clasifican como de emergencia. Por otro lado, 12 kW/m² provocan llama sobre tejido de algodón (BEHNKE, 1984). En extinción de incendios forestales el límite de la resistencia al calor radiante debe ser de 20 kW/m² durante 40 segundos para telas ignífugas utilizadas en la extinción de incendios forestales de acuerdo con la norma UNE 15614: 2007. Por lo cual se agruparon y analizaron los datos obtenidos en estos 5 umbrales, Umbral 1: $q \leq 1$ (kW/m²), Umbral 2: $1 < q \leq 5$ (kW/m²), Umbral 3: $5 < q \leq 7$ (kW/m²), Umbral 4: $7 < q \leq 12$ (kW/m²) y Umbral 5: $12 < q \leq 20$ (kW/m²).

Con estos datos se procedió a calcular la dosis térmica ((kW/m²)^{4/3}·s) y la probabilidad (%) de sufrir quemaduras de primer grado, para cada umbral descrito (Tabla 3). Las tareas en las que se espera un trabajo próximo a las llamas (ataque directo y contrafuego) son las que implican una mayor dosis de flujo recibido, y por consiguiente, estas tareas son las más propensas a causar dolor o daños por exposición al calor. Los valores obtenidos en comparación con los umbrales descritos en la literatura (Tabla 4) indican que la dosis puede presentar riesgos de quemaduras cuando los valores de exposición están por encima de 7 kW/m² (umbral 4). En nuestros resultados, estos umbrales se superaron de manera muy puntual en exposiciones de muy corta duración.

Para calcular la probabilidad del daño, los flujos de calor obtenidos, se han integrado y sumado, como si “TODO” el tiempo del intervalo estuviera bajo esas condiciones. Este análisis tiene

relevancia en los umbrales 4 y 5, donde la exposición puede generar daños. Pues bien, aun así, se ve que la probabilidad de daño es mínima de tener una afectación de nivel 1, es decir, un pequeño y pasajero enrojecimiento de piel.

En este análisis no se contemplan flujos de calor propios de atrapamientos mortales, ni exposiciones indebidas y dolorosas, situaciones que se corrigen a través de los protocolos de actuación OCELA, y observancia de Normas de Seguridad.

Tabla 3. Dosis de calor y probabilidad de quemaduras de primer grado en ataque directo. Valores expresados como media (SD)

	Umbral 1 $q \leq 1$ (kW/m ²)		Umbral 2 $1 < q \leq 5$ (kW/m ²)		Umbral 3 $5 < q \leq 7$ (kW/m ²)		Umbral 4 $7 < q \leq 12$ (kW/m ²)		Umbral 5 $12 < q \leq 20$ (kW/m ²)	
Incendio	Dosis	Prob de daño	Dosis	Prob de daño	Dosis	Prob de daño	Dosis	Prob de daño	Dosis	Prob de daño
1	0,8	0,0%	18,1	0,0%	53,0	0,0%	112,0	0,0%	164,8	6%
2	1,2	0,0%	12,9	0,0%						
3	1,4	0,0%	14,7	0,0%	54,1	0,0%	107,6	0,1%	190,3	10,0%
4	1,6	0,0%	14,9	0,0%	53,8		88,74	0,0%	188,6	9,0%
5	1,4	0,0%	9,6	0,0%	47,3	0,0%				

Tabla 4. Relación quemaduras vs. dosis de calor radiante (O'Sullivan et Jagger, 2004)

Daño Causado	Dosis de Radiación de Infrarrojo térmico (TDU), (kW/m ²) ^{4/3} s	
	Media	Rango
Dolor	92	86-103
Umbral de quemadura de primer grado	105	80-130
Umbral de quemadura de segundo grado	290	240-350
Umbral de quemadura de tercer grado	1000	870-2600

Por último, se procedió a calcular el porcentaje de atenuación para el flujo de calor externo en el área del pecho, promediándose un 62,8%. Este valor indica que para el flujo total de calor externo ambiental, solamente $\approx 37\%$ alcanza el espacio interior del Equipo de Protección Individual (EPI). Este resultado es semejante a otros estudios que encontraron que una sola capa de ropa con un espacio de aire de 4 mm entre la ropa y la piel reduce el transporte de energía radiante a la piel entre un 50 a 70% (RIPPLE et al, 1990; RAJ, 2008).

Análisis en termomán

Como se explicó en la metodología, la exposición a un flujo de calor de 84kW/m² (2cal/cm²/seg) durante un tiempo de exposición a la combustión instantánea de 4 segundos proporciona la información más completa sobre el rendimiento protector de conjuntos de ropa simples y multicapa. Nuestros resultados muestran que tanto el buzo nuevo como el de más de 30 lavados sometidos al test, alcanzaron resultados semejantes, obteniéndose un riesgo de quemadura del 15% (8% de 2º grado y 7% de 3º grado). La distribución de los riesgos aportados por el sistema termomán se muestran en la Figura 4.

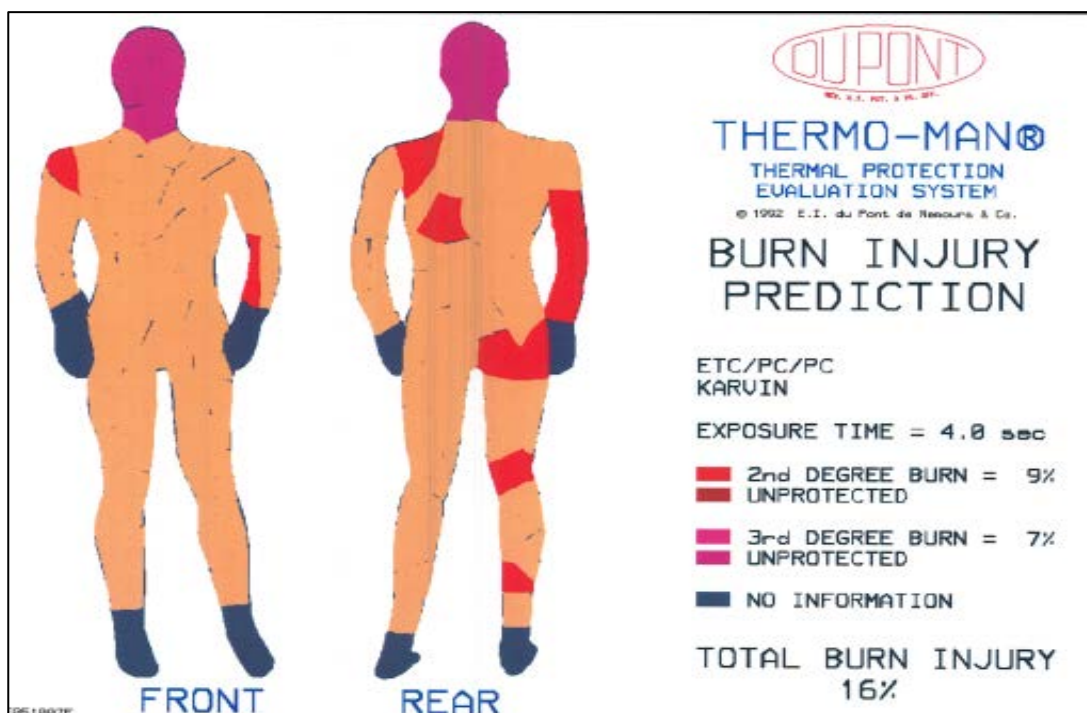


Figura 4. Imagen de los resultados obtenidos con el buzo ignífugo en el Thermomán (Ginebra, Suiza).

Análisis en laboratorio del papel del EPI en la termorregulación del PEEIF

Las pruebas realizadas no han mostrado diferencias significativas entre el esfuerzo ejecutado con ropa deportiva y portando el buzo ignífugo. Tanto la respuesta cardiovascular como termorregulatoria no se ve afectada por la vestimenta utilizada.

5. Conclusiones

Tras analizar el estrés térmico soportado en incendios forestales reales, la realización de pruebas con termomán y analizar el papel del buzo ignífugo en laboratorio, se puede concluir que los equipos utilizados en la actualidad por nuestro personal cumple con sus funciones principales: seguridad ante el flujo de calor proveniente del incendio y eficiencia en cuanto al rendimiento fisiológico y termorregulatorio de los trabajadores.

De cara a este tipo de investigaciones, se hace necesario seguir ahondando en el estudio del papel que juegan los diferentes elementos del EPI en toda la complejidad de las condiciones de trabajo, teniendo en cuenta el balance de calor completo (calor ambiental, temperatura corporal y microclima generado por el buzo ignífugo). La realización de pruebas en este sentido puede tener aplicabilidad tanto en la definición y selección de EPIs, como en la elaboración de normativa y estándares de fabricación.

6. Agradecimientos

Agradecer al PEEIF su desinteresada participación en este trabajo desarrollado por la empresa TRAGSA en colaboración con la Universidad de León, que ha contado con el apoyo de la Dirección General de Medio Natural y Política Forestal del Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente (MAPAMA) y de la Junta de Castilla y León.

7. Bibliografía

- APUD, E.; MEYER, F.; MAUREIRA, F.; 2002. Ergonomía en el combate de incendios forestales. Universidad de Concepción. Chile.
- ARNALDOS, J.; NAVALON, X.; PASTOR, E.; PLANAS, E.; ZÁRATE, L.; 2004. Manual de ingeniería básica para la prevención y extinción de incendios forestales. 1ª Ed. Barcelona: Institut d'Edicions de la Diputació de Barcelona, Mundi-Prensa. Barcelona.
- BAKER, SJ.; GRICE, J.; ROBY, L.; MATTHEWS, C.; 2000. Cardiorespiratory and thermoregulatory response of working in fire-fighter protective clothing in a temperate environment. *Ergonomics*. 42: 1350-1358.
- BRODE, P.; HAVENITH, G.; WANG, X.; CANDAS, V.; GRIEFAHN, B.; 2007. Non-evaporative effects of a wet mid layer on heat transfer through protective clothing. *Eur J Appl Physiol*. 104: 341-349.
- BUDD, GM.; 2001. How do wildland firefighters cope? Physiological and behavioural temperature regulation in men suppressing australian summer bushfires with hand tools. *J Thermal Biol*. 26: 381-386.
- BUDD, GM.; BROTHERHOOD, JR.; HENDRIE, AL.; JEFFERY, SE.; BEASLEY, FA.; COSTIN, BP.; 1997. Project Aquarius 13. The thermal burden of high insulation and encapsulation in wildland firefighters' clothing. *Int J Wildland Fire*. 7: 207-218.
- CHEUNG, SS.; MCLLELAN, TM.; TENAGLIA, S.; 2000. The thermophysiology of uncompensable heat stress. Physiological manipulations and individual characteristics. *Sports Med*. 29: 329-359.
- CHEUVRONT, SN.; GOODMAN, DA.; KENEFICK, RW; MONTAIN, SJ.; SAWKA, MN.; 2008. Impact of a protective vest and spacer garment on exercise-heat strain. *Eur J Appl Physiol*. 102: 577-583.
- DE BOS, J.; MOL, E.; VISSER, B.; FRINGS, M.; 2004. The physical demands upon (Dutch) fire-fighters in relation to the maximum acceptable energetic workload. *Ergonomics*. 47: 446-460.
- EGLIN, CM.; 2007. Physiological responses to fire-fighting: thermal and metabolic considerations. *J Hum Environ Syst*. 10: 7-18.
- GOLDMAN, RF.; 1990. Heat stress in firefighting. *Fire Engineering*. 47-53.
- HAVENITH, G.; 1999. Heat balance when wearing protective clothing. *Ann Occup Hyg*. 43: 289-296.
- HAVENITH, G.; HOLMER, I.; PARSONS, K.; 2002. Personal factors in thermal comfort assessment: clothing properties and metabolic heat production, *Energy and Buildings*. 34: 581-591.

HOLMER, I.; GAVHED, D.; 2007. Classification of metabolic and respiratory demands in fire fighting activity with extreme workloads. *Appl Ergon.* 38: 45-52.

LAWSON, LK.; CROWN, EM.; ACKERMAN, MY.; DALE, JD.; 2004. Moisture effects in heat transfer through clothing systems for wildland firefighters. *Int J Occup Saf Ergon.* 10: 227-238.

MONROY, E.; LUNA, P.; 2011. NTP 922: Estrés térmico y sobrecarga térmica: evaluación de los riesgos (I). INSHT. Madrid.

RAIMUNDO, AM.; FIGUEIREDO, AR.; 2009. Human Personal protective clothing and safety of firefighters near a high intensity fire front. *Fire Safety J.* 44: 514-521.

RAJ, KP.; 2008. Field test on human tolerance to (LNG) fire radiant heat exposure and attenuation effects of clothing and objects. *J Haz Mat.* 157: 247-259.

ROSSI, R.; 2003. Fire fighting and its influence on the body. *Ergonomics.* 46: 1017-1033.

SAUNDERS, AG.; DUGAS, JP.; TUCKER, R.; LAMBERT, MI.; NOAKES, TD.; 2005. The effects of different air velocities on heat storage and body temperature in humans cycling in a hot, humid environment. *Acta Physiol Scand.* 183: 241-255.

SELKIRK, GA.; MCLELLAN, TM.; 2004. Physical work limits for Toronto firefighters in warm environments. *J Occup Environ Hyg.* 1: 199-212.

SMITH, DL.; PETRUZZELLO, SJ.; KRAMER, JM.; MISNER, JE.; 1997. The effects of different thermal environments on the physiological and psychological responses of firefighters to a training drill. *Ergonomics.* 40: 500-510.

TAYLOR, NA.; 2006. Challenges to temperature regulation when working in hot environments. *Ind Health.* 44: 331-344.