



Estrés Térmico

Apuntes

ASIGNATURA: CONDICIÓN FÍSICA Y ESTRÉS TÉRMICO

AUTORA: Dra. Belén Carballo-Leyenda

Grupo de Investigación VALFIS.

Departamento de Educación Física y Deportiva

Universidad de León

FECHA: Abril 2018

Indice

1. El organismo humano y el ambiente térmico.....	3
2. Estrés térmico y sobrecarga térmica.	4
2.1 Sobrecarga por calor.....	5
2.2 Sobrecarga por frío	7
3. Balance térmico	7
3.1 Ecuación general del balance térmico.....	7
3.2 Ecuación práctica del balance térmico.....	8
3.2.1 Radiación	9
3.2.2 Convección	10
3.3.3 Evaporación.....	10
4. Variables del estrés térmico, unidades e instrumento de medición	12
4.1 Unidades de medida de las magnitudes térmicas.....	12
4.2 Variables ambientales	13
4.3 Medida de las variables individuales.....	20
5. Evaluación del estrés por calor. Índices de cálculo	34
5.1 Índices racionales	36
5.1.1 Índice de sobrecarga calórica (Heat Stess Index).....	36
5.1.2 Tasa de sudoración requerida (SWreq)	37
5.1.3 Índice de sobrecarga térmica (IST)	41
5.2 Índices empíricos	45
5.2.1 Temperatura efectiva y temperatura efectiva corregida	45
5.2.2 Tasa de sudoración prevista durante cuatro horas	45
5.2.3 Predicción de la frecuencia cardíaca como índice.....	45
5.2.4 Índice de tensión fisiológica.....	46
5.3 Índices directos	47
5.3.1 Índice de temperatura de globo de bulbo húmedo (WBGT).....	47
6. Efectos sobre la salud.....	49
7. Medidas preventivas.....	52
8. Bibliografía.....	54

1. El organismo humano y el ambiente térmico

El ser humano es un organismo homeotermo. La homeotermia es el proceso mediante el cual un grupo de seres vivos denominados homeotermos mantienen su temperatura corporal dentro de unos límites, independientemente de la temperatura ambiental (Wikipedia consultada el 4/03/2013). Esto implica que las reacciones metabólicas que se producen en el cuerpo humano, requieren una temperatura interna ($37 \pm 1^\circ\text{C}$) para desarrollarse. Para lograr una temperatura interna constante, el organismo genera calor a partir de los alimentos y el oxígeno mediante las complejas reacciones químicas del metabolismo. Una persona sin hacer absolutamente nada y con su gasto energético al mínimo, es decir, solo para mantener su organismo vivo (metabolismo basal), genera entre 65 y 80 W de calor, según sexo, edad y superficie corporal, mientras que una bombilla incandescente de 60 W emite aproximadamente 66 W de calor.

El cuerpo humano extrae la energía que necesita para mantener su cuerpo vivo y activo, de los alimentos y del oxígeno que, a lo largo de complejas reacciones químicas se van convirtiendo en calor. Alrededor del 50% de la energía de los alimentos ya desde el principio del proceso se transforma en calor y el otro 50% se almacena en las células en forma de trifosfato de adenosina (ATP) (Mondelo et al., 2005). Cuando se realiza actividad muscular el ATP se transforma prácticamente en su totalidad en calor ya que los sistemas metabólicos de las células solo aprovechan una pequeña parte de la energía contenida en dicha molécula. Por lo que tanto la eficiencia mecánica del hombre es baja ya que entre el 75% y el 100% de la energía que produce y consume para realizar sus actividades se convierte en calor (Astrand et al., 2003; Mondelo et al., 2005). Cuanto más intenso o mayor duración tenga una cierta actividad física, mayor será la generación de calor produciendo el incremento de la temperatura corporal (Smith y Petruzzello, 1998; Smith et al., 2001; Holmer, 2006).

La temperatura interna o central, es decir la de los tejidos profundos del organismo, es el promedio ponderado de las diferentes temperaturas de las partes y órganos del cuerpo. Estas temperaturas toman diferentes valores según la actividad, parte del cuerpo y la hora oscilando con ritmo circadiano manteniéndose dentro de los $37 \pm 0,6^\circ\text{C}$ aproximadamente incluso en condiciones ambientales adversas. Se llega fácilmente a la conclusión de que constituye una condición indispensable, para la salud y para la vida, mantener la temperatura interna dentro de los estrechos límites vitales de de 4 ó 5 °C (Mondelo et al., 2005).

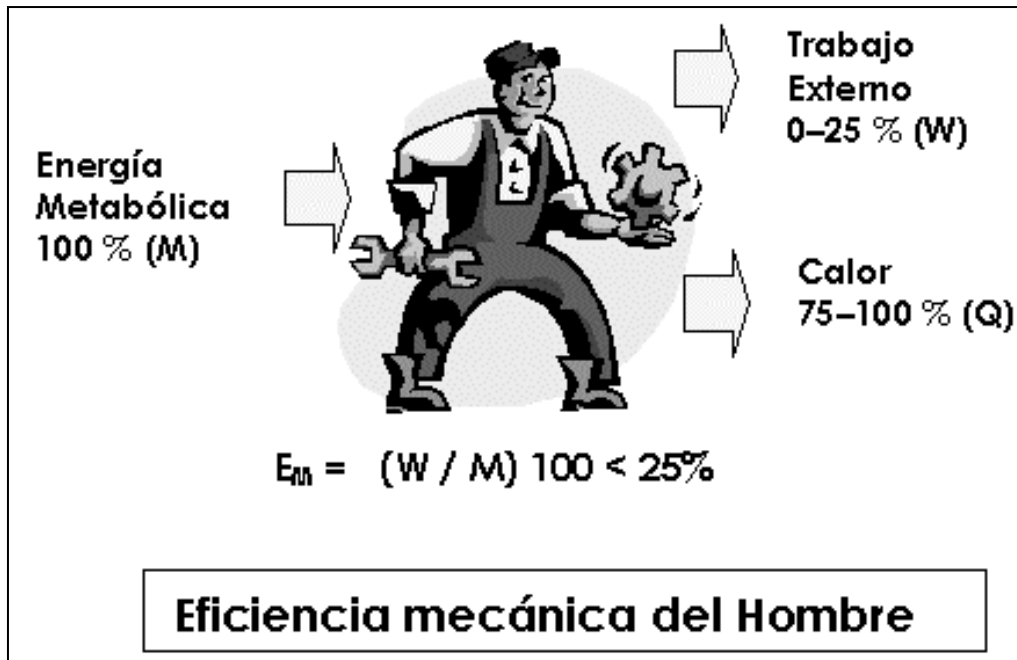


Figura 1. Eficiencia Mecánica del Hombre.

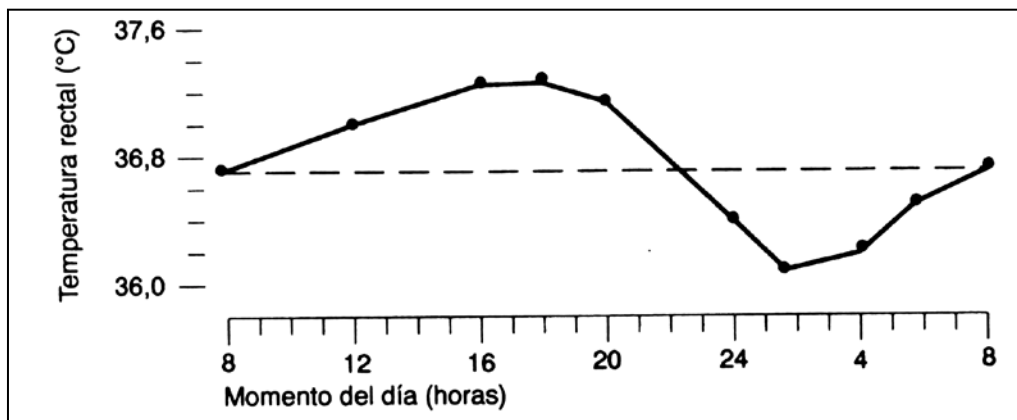


Figura 2. Variación circadiana de la temperatura rectal en un período de 24 horas según Ernst Pöppel.

2. Estrés térmico y sobrecarga térmica.

Todo ambiente térmico que provoque tensiones en la persona que activen sus mecanismos de defensa naturales para mantener la temperatura interna dentro de su intervalo normal, constituye una sobrecarga (Monroy y Luna, 2011; Mondelo et al.; 2005).

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 y 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. Las mediciones de estrés térmico constituyen la base de la evaluación del ambiente térmico de trabajo, pero no predicen de manera exacta si las condiciones bajo las que está trabajando una persona no suponen un riesgo para su salud (Monroy y Luna, 2011).

La sobrecarga térmica es 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.

A efectos prácticos, se considera que el ambiente térmico puede ser de tres tipos:

1. De bienestar o confort
2. Permisible
3. Crítico

En condiciones de bienestar o confort el sujeto se encuentra satisfecho y su organismo mantiene el equilibrio térmico: su temperatura interna se mantiene dentro de los límites fisiológicos normales sin tener que efectuar para ello ajuste de adaptación al medio. En condiciones permisibles se obliga al organismo a efectuar determinados ajustes fisiológicos para alcanzar el equilibrio térmico y conservar la temperatura interna dentro de los límites normales. Esto provoca una tensión térmica o sobrecarga fisiológica más o menos severa, en función de las condiciones ambientales, el tipo de ropa que se use la actividad (que influye en la generación de calor metabólico) y las propias características individuales. Estos ajustes pueden oscilar entre meras molestias psicológicas a unas condiciones fisiológicas de sobrecarga destinadas a devolver el equilibrio térmico al organismo. En condiciones críticas tanto por frío como por calor, no hay equilibrio térmico entre el ambiente y el cuerpo humano. Un ambiente crítico frío implicará que a pesar de los ajustes fisiológicos la temperatura central continuará descendiendo hasta provocar la muerte si el sujeto permanece el tiempo suficiente en esas condiciones. Inversamente en un ambiente crítico por calor, la temperatura se incrementará continuamente con el mismo resultado fatal si el individuo permanece expuesto el tiempo suficiente.

El mantenimiento de la temperatura corporal es el resultado del equilibrio entre ganancias y pérdidas de calor corporal con respecto al microclima en el que se esté. Si las ganancias superan a las pérdidas, el calor se acumula en el organismo y la temperatura tenderá a elevarse hasta alcanzar valores críticos que pueden poner en peligro la vida.

2.1 Sobrecarga por calor

Bajo condiciones calurosas el centro termorregulador incrementa el flujo sanguíneo cargado del exceso de calor interno hacia los vasos capilares de la piel, que puede llegar a ser el 30% del

flujo total. De esta forma la piel aumenta su temperatura y facilita la disipación de calor hacia el entorno por convección y por radiación.

Si las pérdidas de calor por convección y radiación no resultasen suficientes para evitar el incremento de la temperatura corporal, el hipotálamo ordenaría a las glándulas sudoríparas que inicien la segregación de sudor, con el objetivo de que su evaporación provoque la evacuación del calor excesivo de la piel entregado por la sangre que fluye por los capilares cargada del calor interno excedente.

Hay que tener en cuenta que la sudoración de por sí no garantiza la evacuación del calor de la piel, sino que es la evaporación del sudor, la cual no depende del individuo, sino de la humedad contenida en el aire circundante, de la calidad y cantidad de la ropa, y de la velocidad relativa

La excesiva sudoración en ambientes calurosos durante largos períodos de tiempo puede resultar perjudicial, ya que implica una pérdida de agua y de sales, como el cloruro de sodio, que si no son repuestas provocarán importantes daños en el organismo. Si por otra parte el ambiente es muy húmedo y el sudor no se evapora o se evapora poco, la piel mojada frena la sudoración, que puede llegar a ser inútil y un elemento adicional de malestar por su goteo, por el desgaste, etcétera. Pero, aun en un ambiente que facilite la evaporación del sudor, si la piel está mojada el rendimiento evaporativo sólo será del 50%, mientras que si está seca será del 100%.

La pérdida de 1 litro de agua por hora es una sudoración intensa si se prolonga durante 8 horas, que en caso de no reponerse representa la pérdida de 8 litros, con lo que se quebranta el balance hídrico del cuerpo, pues la pérdida de 1,5 litros de agua es suficiente para que el volumen sanguíneo disminuya en una cantidad importante, lo que provocaría el incremento del trabajo cardíaco al aumentar la densidad de la sangre lo que lleva al organismo a una fatiga temprana (González-Alonso et al., 1999) limitando la capacidad de trabajo físico y el tiempo de tolerancia (Cheung et al., 2000).

De los diferentes componentes del sudor, el sodio es el más importante, y su carencia puede ocasionar mayores perturbaciones. Una insuficiencia de cloruro de sodio, o una ingestión excesiva de agua, conduce a estados de depleción salina que se produce cuando la pérdida hídrica resultante de una sudoración profusa y prolongada se repone con agua no suplementada con sal y cuando los niveles circulantes de sodio descienden por debajo de un nivel crítico.

De todo lo anterior se desprende la necesidad de acceder, sin restricciones, al agua potable y fresca, cuando se está expuesto a ambientes calurosos y teniendo presente que la sed no es siempre un estímulo suficiente para la reposición de las cantidades hídricas perdidas. La mayoría de las personas no sienten la necesidad de beber hasta que han perdido entre 1 y 2 l de agua corporal, y si están muy motivadas para realizar un trabajo pesado, pueden sufrir pérdidas de hasta 3 y 4 l antes de que una sed imperiosa les obligue a parar y beber (Nunneley, 1998). por lo que se requiere disciplinar al individuo en la ingestión frecuente de cantidades racionales de agua, que no superen los 100-200 cm³ de una sola vez a una temperatura no inferior a 15 °C para evitar la ralentización del vaciado gástrico. Además cuando la duración de la sobrecarga térmica es prolongada, se hace necesario ingerir líquidos con contenidos en sales que repongan la pérdida de electrolitos por sudoración.

2.2 Sobrecarga por frío

En ambientes fríos el centro termorregulador ordena disminuir el flujo sanguíneo hacia la piel, que puede llegar hasta casi cero, lo que provoca el enfriamiento de la piel, y evita así pérdidas de calor por ésta y propicia la conservación necesaria del calor interno.

Así, de hecho la naturaleza nos convierte en un recipiente térmico. Si a pesar de ello el cuerpo continúa perdiendo calor, se inician los temblores (tiriteo), que no son otra cosa que un ejercicio físico involuntario para generar calor mediante el incremento de la actividad metabólica (por tal motivo, los temblores pueden ser sustituidos por un ejercicio físico volitivo), se incrementa la producción de calor interno por la excitación simpática dirigida a la secreción de adrenalina y noradrenalina que permite la oxidación de los alimentos sobrantes sin sintetizar ATP y produciendo así sólo calor; y la secreción de tiroxina.

Sin embargo, si a pesar de esto el cuerpo continúa perdiendo calor y su temperatura llega a ser inferior a los 34,5 °C, el hipotálamo pierde parte de su capacidad de control de la temperatura corporal; si alcanza valores inferiores a los 29,5 °C, lo pierde totalmente, con lo que cesan los mecanismos de adaptación: las células van disminuyendo su producción de calor y cesan los útiles temblores. No obstante, el organismo aún intenta salvar la situación cuando su temperatura desciende hasta casi la congelación enviando sangre caliente hacia la piel. La piloerección, mecanismo muy útil en muchos animales, carece de efectividad en el ser humano.

3. Balance térmico

3.1 Ecuación general del balance térmico

La energía térmica siempre fluye desde los lugares con mayor temperatura hacia los lugares más fríos. Cuando cualquier objeto recibe calor su temperatura aumenta, y si pierde calor su temperatura disminuye, de forma que el flujo de calor tiende a equilibrar las temperaturas. No se pueden evitar ni el flujo de calor ni el equilibrio final de la temperatura de un cuerpo con su entorno, lo que significa que, por bueno que sea el aislamiento, si no hay aporte de calor, la temperatura de un cuerpo acabará siendo igual a la del ambiente que le rodea.

El concepto de intercambio térmico se puede analizar a través de la ecuación del balance térmico. La persona como todo cuerpo emite calor constantemente hacia el medio y a su vez es receptor del calor que emiten los demás cuerpos. Cuando el balance de entre el flujo de calor generado por el metabolismo y el intercambiado con el ambiente esté en equilibrio, se mantendrá la temperatura interna constante y por lo tanto esta es la situación ideal para el ser humano: las ganancias de calor son iguales a las pérdidas de calor y por lo tanto el balance tiene saldo cero.

El hombre puede ganar o perder calor por las siguientes vías:

1. Por su metabolismo (M), determinado por su metabolismo basal y la actividad que realice.
2. Por radiación de calor (R), que intercambia con los cuerpos de su entorno, en función del gradiente de temperaturas.
3. Por convección (C), en función de la temperatura del aire o agua que le rodean.
4. Por respiración al inspirar aire este puede estar más caliente o más frío que la temperatura corporal, produciéndose un intercambio de calor por convección

respiratoria C_{res} o evaporación respiratoria E_{res} entre la masa de aire inspirada y los pulmones (y viceversa).

5. Por conducción (K), al intercambiar calor por contacto con los cuerpos sólidos en contacto directo.

A su vez el organismo sólo tiene una vía unidireccional para perder calor. Es la evaporación del sudor (E), al entregar calor al sudor en su fase líquida propiciando un cambio de estado de líquido a gaseoso.

Así la ecuación general del balance térmico toma la forma:

$$S = M \pm W \pm R \pm C \pm C_{RES} \pm E_{RES} \pm K - E$$

S: almacenamiento de calor en el cuerpo

Cuando S y E = 0, se considera que existe equilibrio térmico y por lo tanto confort.

S= 0 E>0, equilibrio térmico con condiciones permisibles, los ajustes fisiológicos permiten alcanzar el equilibrio térmico.

S>0, desequilibrio térmico por ganancia de calor, tensión calórica.

S<0, desequilibrio térmico por pérdida de calor, tensión por frío.

3.2 Ecuación práctica del balance térmico

El término K es normalmente insignificante comparado con el intercambio térmico total. Por otro lado la situación de deseada de equilibrio térmico se alcanza cuando el calor acumulado S=0. Así se puede reescribir la ecuación del balance térmico como:

$$M \pm W \pm C_{res} \pm E_{res} - E = \pm R \pm C$$

Para trabajos prácticos la ecuación general del balance térmico se puede reducir a las cuatro vías principales de intercambio de calor:

$$M \pm R \pm C - E = S$$

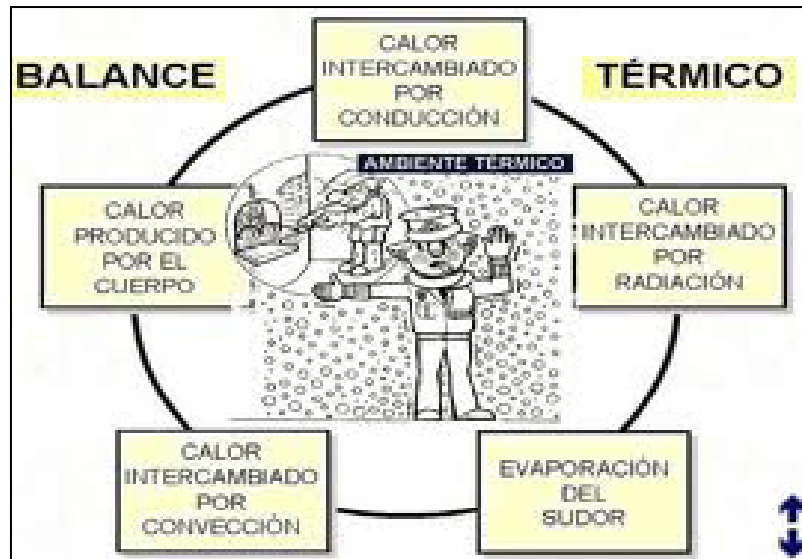


Figura 3. Ecuación práctica del balance térmico.

3.2.1 Radiación

El intercambio de calor por radiación tiene lugar entre la superficie de la persona ya sea su piel o su vestido, y las superficies que le rodean, ya que todo cuerpo emite radiación electromagnética portadora de energía en función de la temperatura. El intercambio térmico que se producirá entre la persona y el medio está definido por la fracción de la superficie que participa en el intercambio, la diferencia entre la temperatura de la piel y la temperatura radiante media y también por las características térmicas del vestido. Así:

$$R = h_r f_{cl} (t_{sk} - t_r)$$

Ecuación que proviene de unir las siguientes expresiones. h_r es el coeficiente de transferencia de calor por radiación en $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$, cuya expresión es:

$$h_r = \sigma \epsilon_{sk} A_r / A_{DU} [(t_{sk} + 273)^4 - (t_r + 273)^4] / (t_{sk} - t_r)$$

Así,

$$R = \sigma \epsilon_{sk} f_{cl} A_r / A_{DU} [(t_{sk} + 273)^4 - (t_r + 273)^4]$$

- f_{cl} es el factor adimensional de reducción, de los intercambios de calor sensible debidos al atuendo. Su valor se deduce de la ecuación:
- $f_{cl} = 1 / [1 / (1 + 1,97 I_{cl}) + (h_c + h_r)] I_{cl}$ donde I_{cl} es el aislamiento térmico intrínseco del atuendo. El aislamiento intrínseco se calcula sumando el valor de aislamiento térmico de cada prenda en función de los valores dados para cada tipo de en la UNE-EN ISO 9920. Si se usan prendas reflectantes el factor f_{cl} debe ser corregido. Para ello se introduce un factor de corrección f_{clR} , que tiene en cuenta el efecto de las prendas de vestir reflectantes:

$$F_{clR} = (1 - A_p) \cdot 0,93 + A_p \cdot f_r$$

- Siendo f_{clR} el factor de reducción del intercambio de calor por radiación, debido a la ropa, A_p la fracción de la superficie del cuerpo cubierta con prendas reflectantes y f_r es la emisividad de la prenda reflectante.
- t_{sk} es la temperatura cutánea media en grados centígrados (se toman 36° C).
- t_a es la temperatura del aire en grados centígrados.
- σ es la constante de Stefan Boltzman (5,67 10⁻⁸ w/m²K⁴).
- ϵ_{sk} es la emisividad cutánea (0,97).
- A_r/A_{DU} es la fracción de superficie cutánea participante en los intercambios de calor por radiación (0,67 para trabajo agachado; 0,70 para trabajo sentado y 0,77 para trabajo de pie).
- t_r es la temperatura radiante media en grados centígrados.

3.2.2 Convección

El proceso de convección se produce debido a las diferencias de temperaturas en entre la superficie de una persona y el aire que la rodea se ve afectada por la velocidad del aire. En convección libre (velocidad del aire < 0,1 m/s) el aire próximo a la piel se calienta o enfría ascendiendo y descendiendo, siendo el hueco ocupado nuevamente por otra masa de aire. Si la convección es forzada, bien por la presencia de viento o corriente de aire, bien por el efecto del propio movimiento del cuerpo (“pump effect”) el proceso de ganancia o pérdida de calor se acelera y hay que tenerlo en cuenta en el cálculo.

$$C = h_c \cdot f_{cl} \cdot (t_{sk} - t_a)$$

h_c es el coeficiente de intercambio de calor por convección en W·m⁻². Se expresa de la siguiente forma:

- Si la convección es natural: $h_c = 2,38 (t_{sk} - t_r)^{0,25}$. Si es forzada: $h_c = 3,5 + 5,2 V_{ar}$. Para V_{ar} es menor o igual que 1 m/s. $h_c = 8,7 V_{ar}^{0,6}$ si V_{ar} es mayor que 1 m/s. Siendo V_{ar} la velocidad relativa del aire, cuya expresión es: $V_{ar} = V_a + 0,0052 (M - 58)$ Donde V_a es la velocidad medida del aire en el lugar de trabajo y M es la tasa metabólica.

3.3.3 Evaporación

La evaporación del sudor es uno de los mecanismos más efectivos de disipar calor corporal. La cantidad de sudor que se evapora varía mucho en función del trabajo que se realice, del tipo de vestido, de la velocidad del aire y del contenido de humedad del mismo. Además está limitada por la capacidad de sudoración de cada persona. Las personas habituadas a trabajar en ambientes calurosos o deportistas, pueden incrementar considerablemente su capacidad de sudoración con lo que obtienen mayor control sobre su temperatura corporal.

Si las condiciones de humedad y velocidad del aire permiten una adecuada evaporación del sudor, entra en juego el tiempo de permanencia en tales condiciones, ya que llega un punto en

que el sujeto perderá su capacidad de sudar, bien por deshidratación o por pérdida de sales minerales tras un periodo prolongado de sudoración

La pérdida de calor por evaporación se considerará permisible o no en función en comparación con la evaporación máxima permisible La pérdida evaporativa máxima es la que el individuo puede realizar bajo la hipótesis de la piel íntegramente mojada, donde se cumple:

$$E_{\max} = (p_{sk,s} - p_a) / R_t$$

En la que:

- $p_{sk,s}$ es la presión de saturación del vapor de agua a la temperatura de la piel en Kilopascales (a 35° C es de 5,624 kPa).
- p_a es la presión parcial del vapor de agua a la temperatura ambiente en kPa. Se calcula mediante la siguiente expresión: $p_a = [10(8,8446-2225/(t_h+273)) - 0,5 (t_a - t_h)] / 7,57$ donde t_h es la temperatura húmeda psicrométrica.
- R_t es la resistencia evaporativa total de la capa limitante de aire y atuendo de vestir. Sus unidades son m^2kpaW^{-1} . Su cálculo se basa en la expresión: $R_t = 1 / 16,7 h_c f_{pcl}$. Aquí, f_{pcl} es el factor adimensional de reducción de los intercambios de calor latente debidos al atuendo. Se calcula a través de la ecuación: $f_{pcl} = 1 / \{1 + 2,22 h_c [I_{cl} - (1 - 1/(1 + 1,97 I_{cl})) / (h_c + h_r)]\}$.

El análisis de las variables que intervienen en esta ecuación pone de manifiesto que estas pueden dividirse en dos grupos:

a) Variables que definen el estado térmico del ambiente:

- Velocidad del aire, V.
- Presión parcial del vapor del agua en el aire, Pa.
- Temperatura del aire o seca, t_a , temperatura húmeda, temperatura radiante media,
- Emisividad en los focos radiantes del local mediante la valoración de la temperatura radiante media (ϵ_{sk} supone que la emisividad de la piel es fija).

b) Variables que definen el estado y posición de cuerpo:

- Producción metabólica de calor, M.
- Las temperaturas corporales: temperatura central (estimada mediante toma de temperaturas esofágica, oral, rectal o gastrointestinal) y temperatura de la piel.
- Posición del cuerpo respecto a los focos radiantes, A.
- El tipo de vestimenta donde la principal variable es el aislamiento térmico de la ropa I_{clo} ($1clo = 0,155 \text{ } ^\circ\text{Cm}^2\text{W}^{-1}$).

4. Variables del estrés térmico, unidades e instrumento de medición

En el estudio de la interacción entre las personas y el ambiente térmico, es necesario analizar los parámetros térmicos propios del cuerpo humano, los factores del ambiente térmico

4.1 Unidades de medida de las magnitudes térmicas

Las unidades clásicas de medida de la energía térmica, la caloría y su múltiplo, la kilocaloría, no están incluidas en el sistema internacional de unidades de uso legal en España. La unidad oficial de energía o calor es el joule (símbolo J), que equivale a 0,239 calorías. El flujo térmico se medirá en watts (símbolo W) o kilowatts (kW). Un kW equivale a 861 kcal/h.

En estudios de Fisiología, Higiene Industrial y Ergonomía tiene interés el flujo térmico por unidad de superficie corporal, que se medirá en W/m², o kW/m². Para ello se relativiza la ganancia o pérdida de calor a la superficie corporal del sujeto. La superficie corporal se calcula a partir del peso y la estatura, mediante tablas, nomogramas o a través de ecuaciones, siendo la más ampliamente utilizada la ecuación de DuBois y DuBois (1916):

$$SC = 0,202 \cdot P^{0,425} \cdot H^{0,725}$$

Donde:

SC: superficie corporal (m²)

P: peso (kg)

H: altura (m)

Sin afectar a la precisión necesaria y suficiente, en la mayoría de estudios se utiliza el valor de superficie corporal de 1,8 m², que es la superficie de un hombre estándar de 70 kg de peso y 1,73 m de altura.

En algunos estudios se utiliza la unidad met, que equivale a un flujo térmico de 58 W/m² (o 50 kcal h⁻¹m⁻²). La definición de met se deduce al considerar el flujo térmico equivalente a la generación media de calor de una persona en reposo (104 W o 90 kcal/h), a través de la superficie corporal media (1,8 m²).

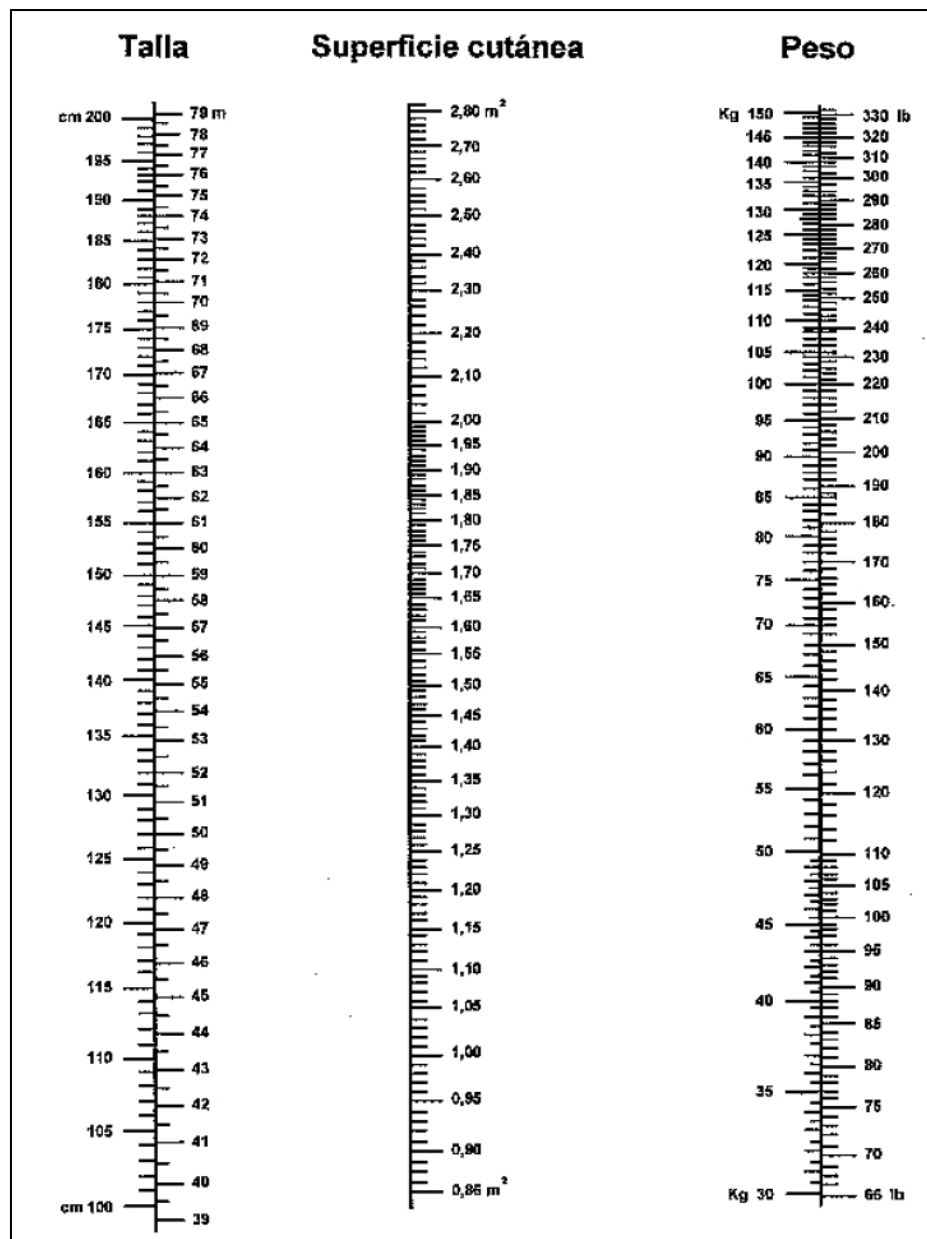


Figura 4. Nomograma para determinar la superficie corporal, conociendo peso y estatura.

4.2 Variables ambientales

Las medidas ambientales necesarias para la evaluación de riesgos requieren el uso de instrumentos fiables y calibrados. Los requisitos exigibles de los instrumentos están descritos en la norma UNE-EN ISO 7726:2002.

4.2.1. Temperatura del aire

El nombre de temperatura seca se refiere, simplemente, a la temperatura del aire, el adjetivo seca es para distinguirla de otra medición de temperatura que se realiza en condiciones especiales, y que se identifica con el nombre de temperatura húmeda. La temperatura es una variable que no se puede medir directamente, y debemos basarnos en medir otra propiedad, que esté directamente relacionada con ella. Los instrumentos de medidas se pueden clasificar en tres grupos: termómetros de bulbo, termopares y termorresistencias y termistores.

Termómetros de bulbo

Se basan en el fenómeno físico de la dilatación que sufren los cuerpos al aumentar su temperatura. Prácticamente se presentan en forma de un depósito (bulbo) prolongado por un tubo capilar cerrado, construido en vidrio transparente, conteniendo una cierta cantidad de un líquido (generalmente mercurio o alcohol). La dilatación del líquido se manifiesta en una variación de la longitud de la columna contenida en el capilar. El capilar lleva grabada una escala de temperaturas sobre la que se lee la temperatura del líquido del termómetro. Es este un instrumento muy sencillo y muy barato, que está muy extendido, y quizá por ello se utiliza sin el cuidado necesario para que el resultado de una lectura sea realmente el valor de la temperatura del aire.

Para que la lectura de la temperatura del aire con un termómetro de bulbo sea correcta es necesario:

- a) Utilizar un termómetro bien calibrado.
- b) Esperar el tiempo necesario para que se estabilice la columna o crear una corriente de aire alrededor del bulbo.
- c) Apantallar el bulbo contra las radiaciones evitando que el apantallamiento impida el buen contacto necesario entre el bulbo y el aire.

Termopares

Estos instrumentos se basan en el efecto Seebeck que es la generación de una diferencia de potencial eléctrico entre dos metales distintos cuando la unión entre ambos está sometida a diferentes temperaturas. En su forma más usual, el medidor de temperaturas por termopares consiste en dos uniones activas, una de ellas sumergida en un medio a temperatura constante y conocida (hielo fundente, por ejemplo) y la otra es la punta de prueba que se sitúa en el ambiente, ambas uniones se conectan en serie, de forma que el potencial eléctrico que aparece en los bornes del sistema es proporcional a la diferencia de temperaturas. El aparato de medida no es más que un potenciómetro cuya escala de lectura está dividida en grados.

Presentan una ventaja importante con respecto al termómetro de bulbo, como es la posibilidad de conectar un registrador, o de efectuar una lectura remota, y el gran margen de utilización disponible con sólo sustituir los termopares.

Los inconvenientes principales son: precio elevado del potenciómetro (los termopares son baratos), necesidad de calibración del instrumento cada vez que se sustituyen los termopares y necesidad de un sistema para fijar la temperatura de referencia.

Termorresistencias y termistores

Ambos se basan en la variación de la resistencia eléctrica con la temperatura, los primeros se refieren a la resistencia de los cuerpos conductores de la electricidad, y los segundos a la resistencia de un cierto tipo de semiconductores. El aparato de medida puede ser un medidor de resistencia (puente de Weasthone) o un medidor de la intensidad que circula por la termorresistencia, o el termistor, cuando se conecta a una diferencia de potencial conocida.

La medida también se verá afectada por los fenómenos expuestos en el caso del termómetro de bulbo, por tanto, se deberá proteger el elemento sensible de las radiaciones, pero en el caso de las termorresistencias existe otro fenómeno que puede causar errores. Al circular una

corriente por el hilo, éste se calienta por efecto de Joule, y la lectura será superior a la temperatura ambiente, para evitarlo es necesario activar la transferencia de calor entre la termorresistencia y el ambiente haciendo circular el aire alrededor de la misma, ya sea moviendo ésta o forzando el paso del aire con un ventilador.

Un medidor por termorresistencias permite la conexión de un registrador y la lectura remota, y no necesita de temperatura de referencia. Por el contrario su precio es más elevado.

4.2.2 Medida de la humedad del aire

La humedad del aire es un concepto directamente relacionado con la cantidad de vapor de agua contenida en una determinada cantidad de aire. Su medida no está normalizada, y se utilizan varias magnitudes relacionadas con dicho contenido como medida de la humedad. La utilización de estas magnitudes en cada caso es función del aspecto particular de la humedad que interese en un problema.

Presión parcial del vapor

Presión que ejercería el vapor de agua si estuviese el sólo ocupando todo el volumen considerado. Se mide en unidades de presión, y está relacionada con la presión total y el porcentaje, en volumen, de vapor de agua en el aire según:

$$P_A = P_T \cdot \phi / 100$$

Donde:

P_A = Presión parcial del vapor de agua (mm de Hg).

P_T = Presión total (mm de Hg).

ϕ = Porcentaje, en volumen, de vapor de agua en el aire.

Humedad absoluta

Masa de vapor de agua contenido en la unidad de masa de aire seco, es función única de la presión parcial del vapor:

$$H = 0,622 \frac{P_A}{700 - P_A}$$

Donde:

H = Humedad absoluta (kg vapor / kg aire seco).

P_A = Presión parcial (mm de Hg).

Humedad relativa

Cociente entre presión parcial del vapor de agua en el aire y la presión de saturación del vapor de agua a la misma temperatura, expresado en porcentaje. Es función de la presión parcial del vapor, y de la temperatura del aire.

Punto de rocío

Temperatura a la cual el vapor de agua contenido en el aire se satura. Es función de la presión parcial del vapor exclusivamente.

Temperatura húmeda

Temperatura estacionaria, que alcanza una pequeña masa de agua sumergida en condiciones adiabáticas en una corriente de aire. Depende de la presión parcial del vapor, y de la temperatura seca del aire. Los valores de estas magnitudes para el aire húmedo se resumen gráficamente en el siguiente diagrama psicrométrico, que ha sido trazado para una presión total de 760 mm de Hg (presión atmosférica).

En este diagrama las líneas de temperatura seca constante son verticales. La escala de temperatura seca se encuentra sobre el eje de abscisas. Las líneas de temperatura húmeda constante son inclinadas, la escala correspondiente se encuentra sobre la línea curva de saturación (100 por 100 de humedad relativa). Las líneas curvas corresponden a humedad relativa constante. Las líneas horizontales son las de punto de rocío constante y se leen sobre el eje de ordenadas, y la humedad absoluta se lee en la paralela al eje de ordenadas.

Los instrumentos para medir la humedad son también muy variados, y de hecho miden una de las magnitudes anteriores, lo que, juntamente con la temperatura seca, nos permite caracterizar perfectamente la mezcla aire - vapor de agua.

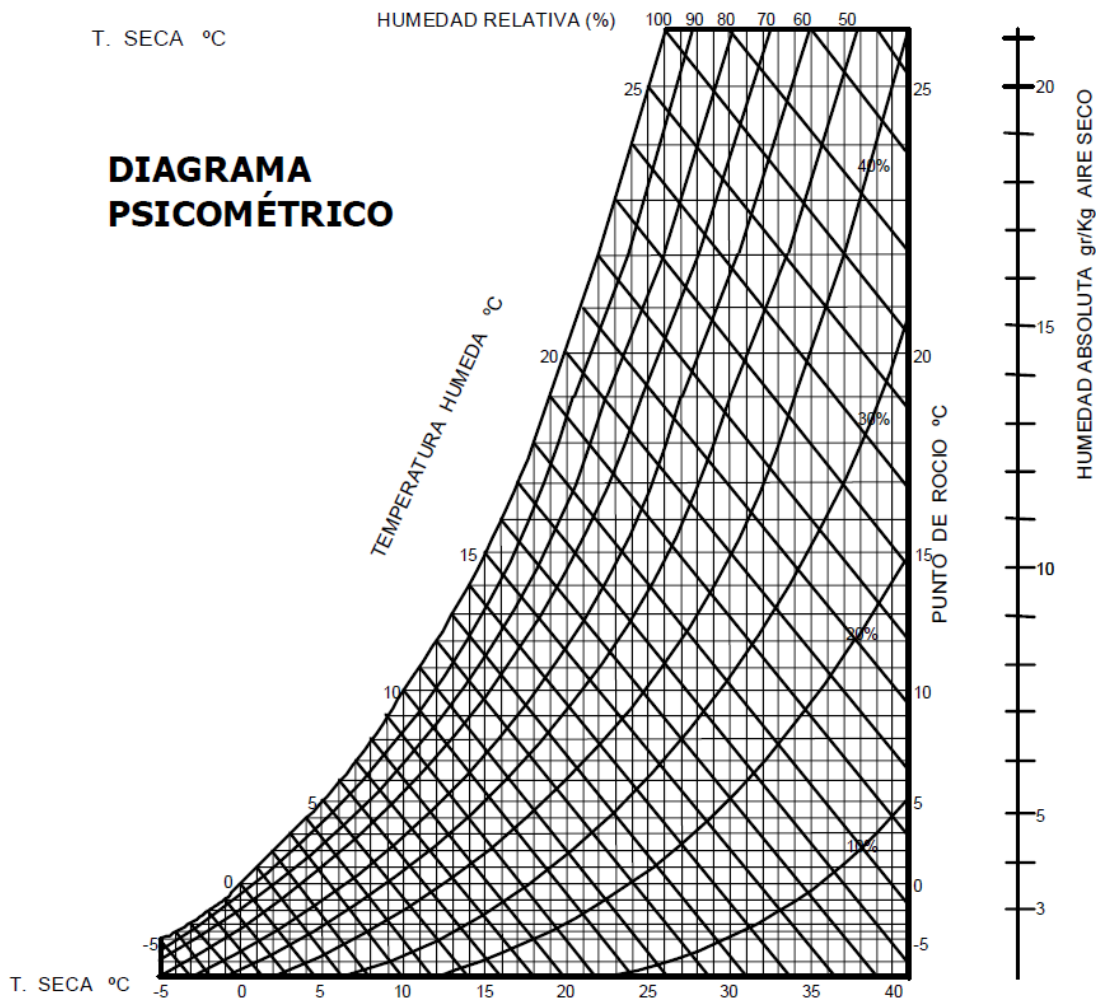


Figura 5. Nomograma para determinar la superficie corporal, conociendo peso y estatura.

El termómetro húmedo

Es un termómetro de bulbo, termopar o termorresistencia, cuyo elemento sensible está recubierto de una muselina limpia que se mantiene empapada en agua destilada. Si el aire se hace circular forzosamente alrededor de la muselina y ésta se protege convenientemente de la radiación de los alrededores, la lectura del termómetro es la temperatura húmeda tal como se ha definido anteriormente, y se puede caracterizar mejor aún llamándola temperatura húmeda sicométrica.

Es necesario insistir en las condiciones de la medición, ya que en ocasiones se llama temperatura húmeda a los resultados de las mediciones no realizadas con las precauciones indicadas que son:

- Muselina limpia.
- Reposición de agua destilada a la temperatura húmeda.
- Circulación forzada del aire.
- Protección contra la radiación.

Las medidas realizadas en otras condiciones son útiles para el estudio de otros fenómenos, pero no son adecuadas para medir la temperatura húmeda sicométrica y, por tanto, no se pueden introducir en un diagrama sicométrico para calcular otras magnitudes, a menos que el diagrama haya sido modificado convenientemente.

Más adelante se estudia una temperatura húmeda, medida sin forzar la circulación del aire, y sin protección contra la radiación, que se utiliza como dato para el cálculo de un índice de medida del estrés térmico.

En cuanto a las ventajas e inconvenientes de utilizar como soporte de la muselina un termómetro de bulbo, un termopar o un termistor o termorresistencia, es aplicable lo expuesto a tratar de la medida de la temperatura seca, ya que estos elementos son los mismos.

La célula higroscópica

Este aparato mide, mediante una termorresistencia, el punto de rocío de una sal muy higroscópica (generalmente el cloruro de litio), que está directamente relacionado con la humedad absoluta del aire en contacto con la sal.

Generalmente los instrumentos de este tipo incorporan además una termorresistencia que mide la temperatura del aire, pudiendo seleccionar la lectura de la humedad absoluta, la temperatura seca o la humedad relativa.

En las medidas de humedad absoluta se debe proteger a la célula de la radiación de los alrededores, y esperar el tiempo necesario para que se alcance el equilibrio y la lectura sea correcta, este tiempo es función de la forma en que se construya la célula y los fabricantes dan las instrucciones oportunas.

4.2.3 Medida de la velocidad del aire

Los aparatos para medir la velocidad del aire se pueden clasificar en tres grupos, según el sistema utilizado para obtener la medida: anemómetros mecánicos, termoanemómetros y velómetros, basados en medidas de presión diferencial.

Anemómetros mecánicos

Se basan en aprovechar la energía cinética del aire en movimiento para mover o desplazar elementos mecánicos, tales como hélices de paso conocido, palancas contrapesadas con muelles, etc., midiendo el movimiento o el desplazamiento por medios eléctricos o mecánicos. Son aparatos muy simples y que apenas necesitan mantenimiento, aunque su construcción es muy delicada si se desea obtener una buena precisión en la medida. Son direccionales y, por tanto, debe cuidarse la posición del aparato en el momento de realizar la medición.

Termoanemómetros

Están constituidos por el acoplamiento de dos termopares o termorresistencias, uno de ellos se calienta artificialmente mediante una corriente eléctrica. La temperatura que alcanza este elemento es función de la temperatura y la velocidad del aire en contacto con él. El termopar o termorresistencia no calentado sirve de referencia, ya que se encuentra a la temperatura del aire, por tanto, la diferencia entre la señales eléctricas dadas por cada elemento es proporcional a la velocidad del aire. Son aparatos muy sensibles y precisos, aunque bastante delicados. Se construyen modelos direccionales y no direccionales.

Velómetros

Están basados en medidas de presión diferencial. Consisten en un orificio que se sitúa en el camino del viento. Antes y después del mismo están instaladas sendas tomas de presión. La velocidad del aire está relacionada con la diferencia de las presiones que existen en ambos puntos, por lo que se puede deducir dicha velocidad a partir de la presión diferencial. Generalmente el instrumento lleva la escala graduada directamente en velocidades. Son instrumentos más sólidos que los anteriores, aunque su precisión para medir velocidades bajas (inferiores a 0,5 m/s) no es muy buena. Son direccionales.

4.2.4 Temperatura radiante media

La radiación calórica puede ser directamente determinada si se conocen las dimensiones, características térmicas (temperatura, emisividad) y la posición relativa del hombre respecto a las fuentes de calor, lo que determina el ángulo de visión entre el cuerpo y la fuente emisora de calor radiante. Salvo en casos muy particulares, se emplea la temperatura radiante media, que es la temperatura uniforme de una esfera negra mate, de gran diámetro, en la cual los intercambios de radiación son iguales a los intercambios de radiación en ambiente real. Por lo tanto la temperatura radiante media permite la determinación indirecta de los intercambios de calor por radiación entre el hombre y el medio.

La temperatura radiante media solo podrá ser determinada por medio de dispositivos que integren en un valor medio las diferentes fuentes de radiación, normalmente heterogénea, que se encuentra en el ambiente de trabajo. El dispositivo más empleado es el termómetro de globo, que mide la temperatura del globo (t_g) a partir de la cual se puede calcular la temperatura radiante media TRM.

La temperatura de globo es la temperatura estabilizada de un termómetro introducido en una esfera de cobre hueca de $D=15$ cm pintada exteriormente de negro que mide la temperatura radiante media del entorno. Debe situarse en la posición que ocuparan las personas. El globo

se calienta por radiación procedente de las fuentes de calor, e intercambia calor por convección con el aire, por lo que se enfría por convección cuando el aire posee temperatura inferior a la del globo y se calienta cuando el aire está a una temperatura mayor.

La respuesta del termómetro de globo es bastante lenta, por eso debe esperarse como mínimo 15 minutos a que la temperatura se estabilice antes de realizar la lectura. Por ello este tipo de termómetro no puede usarse en ambientes en los que las temperaturas radiantes varían rápidamente.

Las ecuaciones para el cálculo de la TRM están recogidas en la norma UNE-EN ISO 7726:2002. Ergonomía en ambientes térmicos. En ésta se recogen cuatro expresiones de cálculo, dependiendo en cada caso, si el trabajador está expuesto a convección natural o forzada, y el tipo de termómetro de globo utilizado.

Usando un termómetro de globo estandarizado (150mm de diámetro $\epsilon_g = 0,95$) las fórmulas que se podrían aplicar en función de cuál sea el coeficiente más alto en la pérdida de calor son:

En convección natural ($v_a < 0,15 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)

$$\bar{t}_r = \left[(t_g + 273)^4 + 0,4 * 10^8 |t_g - t_a|^{\frac{1}{4}} \cdot (t_g - t_a) \right]^{\frac{1}{4}} - 273$$

En convección forzada ($v_a > 0,15 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)

$$\bar{t}_r = \left[(t_g + 273)^4 + 2,5 * 10^8 \cdot v_a^{0,6} \cdot (t_g - t_a) \right]^{\frac{1}{4}} - 273$$

Donde:

v_a = velocidad del aire ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)

t_g = temperatura del globo ($^{\circ}\text{C}$)

t_a = temperatura del aire ($^{\circ}\text{C}$)

t_r = temperatura radiante media

Usando un termómetro de globo no estandarizado las ecuaciones de cálculo son:

$$\bar{t}_r = \left[(t_g + 273)^4 + \frac{0,25 \cdot 10^8}{\epsilon_g} \left(\frac{|t_g - t_a|}{D} \right)^{\frac{1}{4}} \cdot (t_g - t_a) \right]^{\frac{1}{4}} - 273$$

para convección natural y

$$\bar{t}_r = \left[(t_g + 273)^4 + \frac{1,1 \cdot 10^8 \cdot v_a^{0,6}}{\epsilon_g \cdot D^{0,4}} \cdot (t_g - t_a) \right]^{\frac{1}{4}} - 273$$

para convección forzada.

Donde:

ϵ_g : emisividad del globo negro

D: diámetro del globo en metros

4.3 Medida de las variables individuales

4.3.1 Calor metabólico y gasto energético (M)

Calor metabólico

Podemos definir el metabolismo como la suma de las reacciones químicas que se producen en todas las células del organismo. El límite mínimo del metabolismo está determinado por la actividad fisiológica básica para mantenerse vivo, por lo que recibe el nombre de metabolismo basal, que varía con la edad, el sexo, el peso y otras causas de origen psicofísico. A partir del metabolismo basal, la actividad física principalmente y los estados de ánimo incrementarán el metabolismo.

Existen multitud de correlaciones para estimar el consumo metabólico basal, obtenidas por métodos estadísticos; una de las que suele dar resultados más aproximados es la de Boothby, Berkson y Dunn; (1936) que dan los siguientes valores del consumo metabólico por unidad de superficie corporal en función de la edad y el sexo. Los valores aproximados son para la mujer aproximadamente de $40,6 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$ y en el hombre de $42,9 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$ (Mondelo et al.; 2005).

Gasto energético

Los métodos para medir el gasto energético de una actividad física cualquiera pueden ser: por calorimetría directa, calorimetría indirecta o mediante el uso de tablas.

- **Calorimetría directa:** mide el calor que genera el organismo realizando la actividad física que se estudie dentro de un calorímetro, que no es más que una cámara preparada para controlar las condiciones microclimáticas y medir mediante sensores, el calor que genera el individuo mientras realiza el trabajo en cuestión. Es un método muy exacto, pero como contrapartida, no todas las actividades pueden ser realizadas dentro de un calorímetro y por otra parte los calorímetros son muy costosos.
- **Calorimetría indirecta:** se basa en la utilización de otros parámetros que reflejan la generación de calor bien por ser causa directa o su consecuencia. Así este tipo de medición del gasto energético se puede realizar por medición del consumo de oxígeno o bien por medición de la frecuencia cardiaca.
- **Tablas:** Aunque la exactitud es menor que la de las dos medidas anteriores, es suficiente para realizar una evaluación preliminar con el fin de detectar si hay posibilidad de que exista un problema de excesivo gasto energético. Todos los procedimientos de este tipo tienen un patrón común, consisten en tablas en las que se indican valores de la producción de calor a partir de circunstancias observables del trabajo realizado.

El gasto energético a través del consumo de oxígeno

La medición directa del metabolismo se basa en el consumo de oxígeno (VO_2) ya que existe una relación casi lineal entre dicho consumo y el nivel de trabajo físico. El consumo de 1 litro de oxígeno corresponde a $4,85 \text{ kcal} = 20,2 \text{ kilojoules}$. Para ello se debe medir la cantidad de oxígeno inhalado y la cantidad de dióxido de carbono espirado calculando la proporción de oxígeno consumida. Para ello es necesario emplear un analizador de gases que puede ser estático o portátil. Esta instrumentación es compleja en su utilización (debe ser manejada por un fisiólogo o médico) y delicada en su calibración y mantenimiento por lo que este método se usa poco.

El gasto energético a través de la medición de la frecuencia cardiaca

La relación lineal que existe entre la frecuencia cardiaca y el consumo energético es para intensidades de trabajo por debajo del umbral de fatiga, puede ser aprovechada para utilizar la frecuencia cardiaca (FC) como indicador del consumo energético de las actividades físicas.

Para ello se obtiene la recta VO_2 -FC específica del sujeto, sometiéndolo en laboratorio a diferentes intensidades de esfuerzo físico midiendo en cada carga la FC y el VO_2 . Se emplea para ello un veloergómetro o un tapiz rodante. Una vez calculada la recta de cada sujeto es posible determinar el gasto energético de cualquier actividad física mediante su frecuencia cardiaca.

El gasto energético a través de tablas

La estimación del consumo metabólico a través de tablas implica aceptar unos valores estandarizados para distintos tipos de actividad, esfuerzo, movimiento, etc. y suponer, tanto que nuestra población se ajusta a la que sirvió de base para la confección de las tablas, como que las acciones generadoras de un gasto energético son, en nuestro caso, las mismas que las expresadas en las tablas. Estos dos factores constituyen las desviaciones más importantes respecto de la realidad y motivan que los métodos de estimación del consumo metabólico mediante tablas ofrezcan menor precisión que los basados en mediciones de parámetros fisiológicos. A cambio son mucho más fáciles de aplicar y en general son más utilizados. Las tablas pueden ser muy simples (categorías de trabajo ligero, moderado o pesado) o muy detalladas. La norma UNE-EN-ISO 8996:2005 describe varios procedimientos de este tipo basados en distintos modos de categorización de las tablas (por actividades, por profesiones, etc).

Mediante este sistema se puede clasificar de forma rápida el consumo metabólico en reposo, ligero, moderado, pesado o muy pesado, en función del tipo de actividad desarrollada. El término numérico que se obtiene representa sólo el valor medio, dentro de un intervalo posible demasiado amplio. Desde un punto de vista cuantitativo el método permite establecer con cierta rapidez cual es el nivel aproximado de metabolismo. Es un método de escasa precisión.

Un procedimiento más detallado consiste en estimar el consumo metabólico a partir de componentes de la actividad. En las tablas se indican los consumos correspondientes a la postura, al tipo de trabajo y al desplazamiento. La carga metabólica total será la suma ponderada de todos ellos y el metabolismo basal.

El alumno puede encontrar un análisis detallado de los métodos de cálculo de la carga de trabajo a través de tablas en la Nota Técnica de Prevención NTP 323: Determinación del metabolismo energético, publicada por el Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo en el año 1993.

Tabla 1. Consumo metabólico por unidad de superficie corporal en función de la edad y del sexo (Boothby, Berkson y Dunn; 1936).

VARONES		MUJERES	
Años de edad	Kcal/m ² /h	Años de edad	Kcal/m ² /h
6,00	53,00	6,00	50,62
7,00	52,45	6,50	50,23
8,00	51,78	7,00	49,12
8,50	51,20	7,50	47,84
9,00	50,54	8,00	47,00
9,50	49,42	8,50	46,50
10,00	48,50	9-10	45,90
10,50	47,71	11,00	45,26
11,00	47,18	11,50	44,80
12,00	46,75	12,00	44,28
13-15	46,35	12,50	43,58
16,00	45,72	13,00	42,90
16,50	45,30	13,50	42,10
17,00	44,80	14,00	41,45
17,50	44,03	14,50	40,74
18,00	43,25	15,00	40,10
18,50	42,70	15,50	39,40
19,00	42,32	16,00	38,85
19,50	42,00	16,50	38,30
20-21	41,43	17,00	37,82
22-23	40,82	17,50	37,40
24-27	40,24	18-19	36,74
28-29	39,81	20-24	36,18
30-34	39,34	25-44	35,70
35-39	38,68	45-49	34,94
40-44	38,00	50-54	33,96
45-49	37,37	55-59	33,18
50-54	36,73	60-64	32,61
55-59	36,10	65-69	32,30
60-64	35,48		
65-69	34,80		

Tabla 2. Estimación del metabolismo según la intensidad del trabajo (ISO 7243: 2002)

CLASIFICACIÓN DE LA ACTIVIDAD METABÓLICA		
Actividad	Generación de calor (W/m ²)	Valor medio Para cálculos (W/m ²)
Reposo absoluto	M<65	65
Actividad ligera	65<M<130	100
Actividad moderada	130<M<200	165
Actividad pesada	200<M<260	230
Actividad muy pesada	M>260	290

Tabla 3. Estimación del metabolismo por componentes en función de la postura (UNE-EN-ISO 8996:2005).

CONSUMO METABÓLICO DEBIDO A LA POSICIÓN DEL CUERPO (W/m²)	
Sentado	10
Arrodillado	20
Agachado	20
De pie	25
De pie inclinado	30

Tabla 4. Estimación del metabolismo por componentes en función del tipo de trabajo (UNE-EN-ISO 8996:2005).

CONSUMO METABÓLICO DEBIDO AL TIPO DE TRABAJO (W/m²)		
	valor medio	intervalo
Trabajo con las manos		
ligero	15	<20
medio	30	20-35
intenso	40	>35
Trabajo con un brazo		
ligero	35	<45
medio	55	45-65
intenso	75	>65
Trabajo con dos brazos		
ligero	65	<75
medio	85	75-95
intenso	105	>95
Trabajo con el tronco		
ligero	125	<155
medio	190	155-230
intenso	280	230-330
muy intenso	390	>330

Tabla 5. Estimación del metabolismo por componentes en función del movimiento (UNE-EN-ISO 8996:2005).

CONSUMO METABÓLICO DEBIDO AL DESPLAZAMIENTO	
	M (W/m²)/(m/s)
Velocidad de desplazamiento considerada en sentido horizontal	
Andar entre 2 y 5 km/h	110
Andar en subida entre 2 y 5 km/h	
inclinación 5°	210
inclinación 10°	360
Andar en bajada, 5 km/h	
inclinación 5°	60
inclinación 10°	50
Andar con carga (4 km/h)	
carga de 10 kg	125
carga de 30 kg	185
carga de 50 kg	285
Velocidad de desplazamiento considerada en sentido vertical	
Subir una escalera	1725
Bajar una escalera	480
Subir una escala inclinada	
sin carga	1660
carga de 10 kg	1870
carga de 50 kg	3320
Subir una escala vertical	
sin carga	2030
carga de 10 kg	2335
carga de 50 kg	4750

4.3.2 Indicadores fisiológicos de tensión calórica

Los indicadores fisiológicos de la tensión calórica generalmente más utilizados son:

- 1 la frecuencia cardíaca (FC);
- 2 la temperatura interna (t_i);
- 3 la pérdida de peso por sudoración (S).

Es posible, en general, analizar los factores que alteran esas funciones de respuesta a diferentes niveles de sobrecarga metabólica y ambiental, y determinar qué mediciones son probablemente las más adecuadas según las circunstancias.

Es importante utilizar varios, y no sólo uno, de estos indicadores, e integrar los resultados para llegar a conclusiones certeras, teniendo en cuenta que la termorregulación es un mecanismo sumamente complejo, que los indicadores reaccionan muchas veces por otras causas ajenas a

la tensión térmica y no siempre es posible practicar mediciones fidedignas de todos los factores pertinentes en el lugar de trabajo.

Frecuencia cardíaca

La frecuencia cardíaca puede considerarse como un indicador sencillo de la carga que impone al sistema circulatorio la acumulación de calor, incluso para tensiones térmicas ligeras y moderadas. Este indicador permite evaluar la tensión calórica que provoca la sobrecarga calórica en las personas, en su entorno habitual de actividades, midiendo la frecuencia cardíaca con las mismas actividades pero bajo condiciones de confort térmico y comparando los resultados con la frecuencia cardíaca bajo las condiciones habituales de sobrecarga calórica.

Sin embargo, hay que tener en cuenta, a la hora de decidir su utilización como indicador, que la frecuencia cardíaca también se incrementa con el trabajo, la postura, los estados emocionales, incluso los provocados por el propio acto de medición, estados patológicos, y sutiles acontecimientos inesperados durante las mediciones (Mondelo et al.; 2005).

Hay varias medidas posibles de la frecuencia cardíaca que pueden utilizarse como indicadores de la tensión calórica:

- 1 la frecuencia efectiva de pulsaciones durante el trabajo;
- 2 la frecuencia efectiva de pulsaciones al final del mismo;
- 3 la aceleración del pulso durante un período o un día de trabajo
- 4 el tiempo que tarda la frecuencia del pulso en volver a su nivel de reposo después del trabajo.

En las actividades diarias y prolongadas de exposición a sobrecarga calórica, la información que puede ofrecer la frecuencia cardíaca al final de la jornada resulta menos interesante que las máximas registradas durante la jornada de manera intermitente, o que el aumento de la frecuencia normal de pulsaciones a lo largo del día. Las frecuencias cardíacas máximas corresponden a esfuerzos máximos, a exposiciones máximas al calor, o a ambas cosas a la vez, y pueden estudiarse por separado. La aceleración del pulso puede estudiarse también en relación a todo el tiempo de trabajo o a períodos intermitentes de trabajo y descanso a lo largo de la jornada.

La medición de la frecuencia cardíaca es relativamente simple y se puede efectuar durante la actividad del individuo sin alterar significativamente su trabajo. Para ello se puede disponer de electrocardiógrafos, cardiotacómetros o simples pulsómetros, que son la instrumentación más ampliamente utilizada.

Es necesario aclarar que, a pesar de que el consumo de oxígeno y la frecuencia cardíaca son directa y linealmente proporcionales hasta aproximadamente las 170 pulsaciones por minuto (umbral anaeróbico) en actividades físicas, y que el comportamiento de las curvas de ambos en el tiempo de duración de las actividades son muy parecidas, la sobrecarga calórica no influye perceptiblemente sobre el consumo de oxígeno, de manera que no es posible utilizar el consumo de oxígeno como indicador de la tensión calórica.

Temperatura corporal

El uso de la temperatura interna como indicador está limitado a tensiones calóricas severas, ya que las tensiones moderadas no provocan normalmente incrementos. Por tal motivo, este

indicador se utiliza para establecer límites máximos que, según varios autores, están entre los 38 °C y los 39 °C.

Al contrario de la frecuencia cardíaca, la medición de la temperatura interna no es sencilla ni cómoda, ya que tendría que medirse en el esófago o en el recto para que fuese lo suficientemente exacta. En la práctica, por lo tanto, se acude a la medición de la temperatura en el tímpano, o de la temperatura sublingual, esta última, con las debidas precauciones durante las mediciones: no respirar por la boca, ni hablar, ni consumir bebidas frías ni calientes minutos antes de las mediciones. Sin embargo también se emplea la temperatura gastrointestinal como indicador de la temperatura corporal, por resultar más sencilla y cómoda su medición en ambientes laborales. Para su medición se emplean cápsulas dotadas con sensores que se tragan pasando a registrar la temperatura dentro del tracto digestivo que para muchos autores es la medida más parecida a la temperatura recta (McKenzie y Osgood 2004) siempre que se tomen las debidas precauciones: ingerir la capsula al menos tres horas antes de querer registrar la temperatura (Laursen et al. 2006) para que esta no se vea influenciada por la ingesta de bebida o comida.

Para las mediciones de las temperaturas fisiológicas se utilizan distintos tipos de instrumentos: termómetros de mercurio, sensores (termistores, termopares, etc.), termografía y radiometría infrarrojas, medidores de flujo de calor y termómetros infrarrojos, etcétera, que se sitúan en los puntos específicos en los que se quiere conocer la temperatura (recto, esófago, piel...).

Sudoración

Respecto a la sudoración, se acepta que, en sujetos aclimatados, la cantidad de sudor generado es proporcional a la tensión calórica que lo ha provocado, por lo que sólo es posible la utilización de este indicador con individuos aclimatados; de lo contrario será necesario aclimatarlos antes.

La medición de la pérdida de peso por sudoración se efectúa pesando al sujeto antes y después de la actividad con una báscula cuya precisión debe ser al menos de 50 gramos, deduciendo del peso final el saldo resultante de los líquidos y los alimentos ingeridos y excretados durante la jornada, lo que obliga a pesar meticulosamente todo lo que entre y salga del cuerpo durante la actividad. Otro aspecto que hay que tener en cuenta es el sudor que se acumula en la ropa, por lo que se recomienda efectuar las pesadas, inicial y final, del sujeto desnudo y seco.

4.3.3 El papel de la ropa

Otro factor muy importante es el vestido, que modifica la interrelación entre el organismo y el medio al formar una frontera de transición entre ambos que amortigua o incrementa (según el caso) los efectos del ambiente térmico sobre la persona.

La transferencia de calor a través de la ropa o, al contrario, el aislamiento que proporcionan las prendas de vestir, depende en gran medida de que el aire quede atrapado en y sobre la ropa. La ropa consiste, como primera aproximación, en cualquier tipo de material que atrape capas de aire. Es una definición aproximada porque algunas de las **propiedades de los materiales** son importantes, como la construcción mecánica de los tejidos (por ejemplo, resistencia al viento y capacidad de las fibras para soportar tejidos gruesos) y las **propiedades intrínsecas** de las fibras (por ejemplo, absorción y reflexión de calor radiante, absorción de vapor de agua, transpiración del sudor).

Las capas de aire se forman por adhesión de moléculas de gas a cualquier superficie, por cohesión de una segunda capa de moléculas a la primera, y así sucesivamente. Con todo, las fuerzas que unen a las sucesivas capas son cada vez más débiles, de manera que las moléculas exteriores se mueven incluso con movimientos externos de aire muy pequeños. Cuando el aire está inmóvil, las capas de aire pueden tener un grosor de hasta 12 mm, pero cuando el movimiento del aire aumenta y se reduce a menos de 1 mm. El aire inmóvil actúa como una capa aislante que tiene una conductividad constante con independencia de la forma del material. Las alteraciones de las capas de aire producen una pérdida de grosor efectivo; estas alteraciones pueden estar causadas no sólo por el viento, sino también por el movimiento de la persona que lleva la ropa, desplazamiento de todo el cuerpo y movimiento de ciertas partes del cuerpo.

La radiación es otro importante mecanismo para la transferencia de calor. Todas las superficies irradian calor y absorben el calor irradiado por otras superficies. El flujo de calor radiante es aproximadamente proporcional a la diferencia de temperatura entre las dos superficies que participan en el intercambio. Una capa de ropa entre ambas superficies interferirá en la transferencia de calor radiante al interceptar el flujo de energía; la ropa alcanzará una temperatura próxima a la temperatura media de las dos superficies, reduciendo a la mitad la diferencia de temperatura entre ellas y, por consiguiente, reduciendo también a la mitad el flujo de calor radiante. Al aumentar el número de capas interpuestas, disminuye la velocidad de transferencia de calor.

Las capas de aire ofrecen también resistencia a la difusión del sudor evaporado de la piel húmeda al ambiente. La resistencia es más o menos proporcional al grosor del conjunto de prendas. Los tejidos impermeables o con tratamientos superficiales, pueden ofrecer una resistencia imprevisible al vapor que debe determinarse por medición.

El aislamiento que proporciona un conjunto de prendas de vestir depende en gran medida de su diseño. Los parámetros del diseño que influyen en el aislamiento son el número de capas, las aberturas, el ajuste, la distribución del aislamiento por el cuerpo y las zonas de piel al descubierto. Algunas propiedades de los materiales, como su permeabilidad al aire, su reflectancia y los revestimientos son también importantes. Del mismo modo los parámetros que caracterizan los tejidos en su conjunto, deben ser tenidos en cuenta en el intercambio de calor.

En las últimas décadas se ha avanzado en la mejora del rendimiento de los tejidos y trajes para la exposición al calor, tanto en la búsqueda de nuevos materiales, como en los métodos de análisis empleados en su evaluación. Existen tres métodos diferentes para determinar las propiedades térmicas de un traje. El primero implica el uso de un calorímetro o "hot plate" y se emplea habitualmente en el análisis de transferencia de calor en muestras de un determinado tejido. El segundo método es el método del maniquí, que aproxima en mayor medida las condiciones reales de uso, y tienen en cuenta factores globales como el efecto del diseño, la talla los acabados etc, que van más allá del comportamiento físico del tejido, y que inciden en gran medida en el rendimiento de un traje de protección. Finalmente la evaluación realizada en humanos analiza el comportamiento de las variables fisiológicas en función del tipo de traje empleado y las variables ambientales escogidas.

La mayoría de las estimaciones del aislamiento total de la ropa se han realizado para condiciones estáticas (sin movimiento, sin aire) o en interiores, porque los datos disponibles se obtuvieron de maniqués térmicos (McCullough, Jones y Huck, 1985). Las mediciones en seres

humanos son laboriosas y los resultados varían ampliamente. Desde mediados del decenio de 1980 se han desarrollado y utilizado maniqués móviles fiables (Olesen y cols. 1982; Nielsen, Olesen y Fanger 1985). En los últimos años se están llevando a cabo estudios con maniqués capaces de sudar que están permitiendo mejorar el estudio del comportamiento del vapor de agua cuando se usa ropa (Fang y Cheng, 2002; Gao et al, 2006; Wang et al, 2011). Sin embargo éstos estos estudios de momento, no permiten realizar una distribución realista de la tasa de sudoración en el cuerpo ya que no tienen en cuenta todavía, la distribución irregular de la sudoración, en los seres humanos (Lotens; 1998). Asimismo, la mejora de las técnicas de medición ha permitido realizar experimentos humanos más exactos ampliamente empleados en la literatura (Nunneley, 1989; McLellan et al., 1996; Budd et al., 1996; Baker et al., 2000; Havenith et al; 2011) ya que a pesar de su amplia variabilidad, tienen en cuenta factores propios del comportamiento del cuerpo humano como por ejemplo la distribución de la sudoración.

Parámetros físicos de la ropa

Aislamiento térmico I_t : dificultad que el traje de protección presenta a la entrada y salida de calor seco. Depende de las propiedades de las fibras y materiales así como su construcción formando capas de aire y tejido, las cuales son las responsables de las características de aislamiento. Generalmente se expresa de modo simplificado, como el grosor del conjunto de la ropa. Se mide en $^{\circ}\text{Cm}^2/\text{W}$, siendo la unidad mas popularmente usada el clo $1 \text{ clo} = 0,155 \text{ }^{\circ}\text{Cm}^2/\text{W}$ que se define como el aislamiento necesario para mantener confortable a una persona que desarrolle una actividad sedentaria (menos de 60 W/m^2) a una temperatura de $21 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

$$I_{cl} = (t_{sk} - t_a) / (R + C)$$

$$I_a = (t_{cl} - t_a) \cdot f_{cl} / (R + C)$$

$$I_t = I_{cl} + I_a / f_{cl}$$

Donde:

I_t : aislamiento térmico total de la ropa ($^{\circ}\text{Cm}^2/\text{W}$)

I_{cl} es el aislamiento intrínseco, sin tener en cuenta la capa de aire adyacente ($^{\circ}\text{Cm}^2/\text{W}$)

I_a es el aislamiento de la capa de aire adyacente a la piel ($^{\circ}\text{Cm}^2/\text{W}$)

t_{sk} : temperatura de la piel ($^{\circ}\text{C}$)

t_a : temperatura del aire ambiental ($^{\circ}\text{C}$)

$R+C$: intercambio de calor "seco" suma del calor intercambiado por radiación y convección por unidad de superficie corporal (W/m^2)

f_{cl} es el factor de la superficie de la ropa

Resistencia evaporativa $R_{e,t}$: resistencia al paso de la humedad a través de la ropa desde la piel al medio (m^2/W).

$$R_{e,t} = P_{sk} - P_a / E_{req}$$

Donde:

P_{sk} : presión de saturación del vapor de agua en la piel

p_a : presión de vapor del aire ambiental ($^{\circ}\text{C}$)

R+C: intercambio de calor "seco" suma del calor intercambiado por radiación y convección por unidad de superficie corporal (W/m^2)

Cuando las condiciones de calor activan los procesos de termorregulación, se comienza a sudar para reducir la temperatura corporal y poder alcanzar el equilibrio. Por lo tanto la evaporación necesaria debe cumplir la ecuación.

Por otro lado, la máxima evaporación depende del contenido de humedad del medio. Cuanto mayor es el contenido de humedad ambiental, con mayor dificultad se evapora el sudor y también de las características físicas del traje de protección, es decir, la resistencia evaporativa:

$$E_{\max} = (p_{sk,s} - p_a) / R_t$$

Para diversas configuraciones de ropa, el asilamiento térmico I_{cl} viene tabulado en la norma UNE-EN ISO 9920. Para determinar el valor del aislamiento térmico de una determinada configuración de ropa no hay más que buscar en dichas tablas los valores individuales de cada prenda y sumarlos.



Figura 6. Maniquí térmico móvil para ensayos del comportamiento de la ropa.

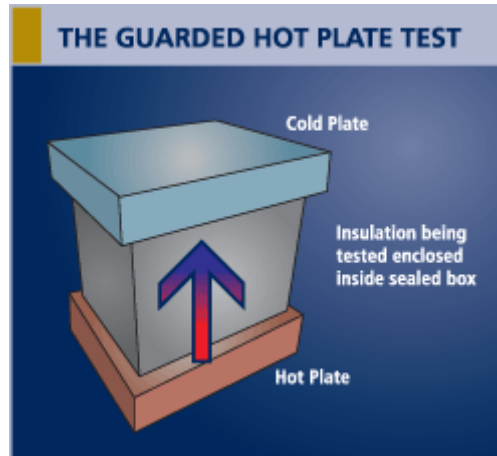


Figura 7. Calorímetro para determinación de aislamiento térmico de especímenes de tejidos.

Tabla 6. Aislamiento térmico de diferentes prendas de vestir (UNE-EN-ISO 9920:2009).

DESCRIPCIÓN DE LAS PRENDAS	RESISTENCIA TÉRMICA I_{cl} (clo)
ROPA INTERIOR	
Calzoncillos	0.03
Calzoncillos largos	0.10
Camiseta de tirantes	0.04
Camiseta de manga corta	0.09
Camiseta de manga larga	0.12
Sujetadores y bragas	0.03
CAMISAS BLUSAS	
Manga corta	0.15
Ligera, mangas cortas	0.20
Normal, mangas largas	0.25
Camisa de franela, mangas largas	0.30
Blusa ligera, mangas largas	0.15
PANTALONES	
Corto	0.06
Ligero	0.20
Normal	0.25
Franela	0.28
VESTIDOS - FALDAS	
Falda ligera (verano)	0.15

Falda gruesa (invierno)	0.25
Vestido ligero, mangas cortas	0.20
Vestido de invierno, mangas largas	0.40
Mono de trabajo	0.55
PULLOVER	
Chaleco sin mangas	0.12
Pullover ligero	0.20
Pullover medio	0.28
Pullover grueso	0.35
CHAQUETA	
Chaqueta ligera de verano	0.25
Chaqueta normal	0.35
Bata de trabajo (guardapolvo)	0.30
FORRADAS CON ELEVADO AISLAMIENTO	
Mono de trabajo	0.90
Pantalón	0.35
Chaqueta	0.40
Chaleco	0.20
PRENDAS EXTERIORES DE ABRIGO	
Abrigo	0.60
Chaqueta larga	0.55
Parka	0.70
Mono forrado	0.55
DIVERSOS	
Calcetines	0.02
Calcetines, gruesos, cortos	0.05
Calcetines, gruesos, largos	0.10
Medias de nylon	0.03
Zapatos de suela delgada	0.02
Zapatos de suela gruesa	0.04
Botas	0.10
Guantes	0.05

Papel del equipo de protección individual (EPI) en el estrés térmico

La extinción de incendios forestales conlleva una serie de riesgos específicos para el personal implicado en su extinción, debido a las condiciones propias de trabajo en las que se realiza esta actividad. Los factores de riesgo debidos a la realización del trabajo próximo al fuego y al aire libre en verano, tanto de modo indirecto (i.e estrés térmico, inhalación de humos y partículas) como los debidos al efecto directo de las llamas (i.e quemaduras por contacto con las llamas o superficies a elevada temperatura, quemaduras por escaldadura) constituyen unos de los riesgos más importantes debido a la gravedad de las lesiones que producen. Estos factores de riesgo no evitables, hacen que el uso de un Equipo de Protección Individual (EPI) sea obligatorio para la protección del personal de extinción, en particular desde la promulgación de la Ley

31/1995 de Prevención de Riesgos Laborales y su normativa de desarrollo acerca de la adecuada selección en función de los riesgos a evitar (RD 773/1997) y comercialización de los equipos de protección individual, así como los estándares que éstos deben cumplir para obtener el certificado de la Comunidad Europea) (RD1407/1992). Por lo tanto el uso del Equipo de Protección Individual, constituye otro factor a tener en cuenta en la termorregulación en trabajos en calor. Este tipo de ropa está especialmente diseñada para frenar la entrada de calor radiante (AENOR, UNE-EN340, 2004) y convectivo (AENOR, UNE-EN367, 1994) del exterior, además de no arder al contacto con la llama (AENOR, UNE-EN531, 1998). Desde 2007 existe una norma que engloba los requisitos anteriores en una sola específica para bomberos forestales, la UNE-EN 15614:2007 Ropa para bomberos forestales ([ver documento explicativo en la documentación del curso que se ha colgado en Moodle](#)).

Los tejidos empleados en la confección de la ropa de protección pueden ser de origen sintético (variantes del nylon tipo Aramidas, Nomex o Kevlar) así como naturales (algodón ignífugado). 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). Apud et al. (2002) informaron que el 40% del sudor producido por los bomberos 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). 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). En este contexto la evaporación del sudor, si las condiciones ambientales lo permiten, se produce sobre la ropa y no sobre la piel, limitando así aun más la pérdida de calor (Nunneley, 1988; McLellan et al., 1996). Por lo tanto lo ideal para el PEEIF es llevar una ropa de protección que proteja del ambiente exterior adverso pero que a su vez permita una buena eliminación del calor corporal generado (Baker y cols., 2000; Budd, 2001; Eglin, 2007),

4.3.4 Otros factores individuales

No resulta sencillo determinar los efectos de la exposición al calor o al frío, pues algunos factores son difíciles de identificar y evaluar. Al efectuar experimentos con grupos de personas expuestas a condiciones de sobrecarga térmica, sucede que las reacciones resultan muy variadas y se producen algunas respuestas completamente diferentes. Esto puede ser, simplemente, consecuencia de las diferencias fisiológicas entre sujetos. Pero también pueden intervenir otros factores personales más sutiles, como es el estado físico de las personas, que puede variar en unas horas por múltiples causas. Entre estos factores personales de riesgo, que reducen la tolerancia individual al estrés térmico, se encuentran la edad, la constitución corporal, la obesidad, el consumo de medicamentos o bebidas alcohólicas, el género y la aclimatación.

Edad

Con la edad los mecanismos termorreguladores del organismo se hacen menos eficientes. La frecuencia cardíaca máxima y la capacidad de trabajo físico disminuyen, y la producción de calor metabólico correspondiente a una determinada cantidad de trabajo aumenta poco o nada con la edad. En ambientes muy calurosos, las personas de más edad tropiezan con más

dificultades que las jóvenes para disipar la carga calorífica, al parecer debido a un retraso en la respuesta de sudoración, que se muestra lenta, y a una disminución de la capacidad de disipar calor, lo que da como resultado un almacenamiento superior de calor durante la actividad, y un aumento del tiempo necesario para la recuperación

Constitución corporal y obesidad

Las personas corpulentas están en desventaja en ambientes cálidos pero en ventaja en los ambientes fríos, frente a las personas menos corpulentas. Esto se debe a que la producción de calor de un cuerpo es proporcional a su volumen (W/m^3), mientras que la disipación es proporcional a su superficie (W/m^2), por lo que, a medida que aumenta el tamaño corporal la relación superficie-volumen se hace cada vez menor, dado que la superficie crece con el cuadrado de sus medidas y el volumen crece al cubo.

La persona con sobrepeso presenta una serie de desventajas a la hora de enfrentarse a una situación de estrés térmico debido al incremento del aislamiento térmico que sufre el cuerpo al tener una capa de tejido adiposo más gruesa, las posibles deficiencias del sistema cardiovascular y la baja condición física. De todas formas, existen excepciones, por lo que se deben analizar de manera específica los requerimientos individuales de cada persona a la hora de evaluar el riesgo de exposición al estrés térmico para cada trabajador.

Medicamentos y bebidas alcohólicas

Existen medicamentos anticolinérgicos que pueden llegar a inhibir la sudoración especialmente en individuos de mayor edad. Algunos sedantes afectan a la sensación de sed, otros fármacos intervienen en la termorregulación, incrementan el calor metabólico y reducen la distribución del calor, condicionando la circulación periférica. En relación al alcohol, produce vasodilatación periférica y diuresis, que afectan a la respuesta del cuerpo al estrés térmico. Asimismo, bajas dosis de alcohol reducen la capacidad de termorregulación, incluyendo los reflejos vasomotores y la sudoración, y aumentan la probabilidad de una bajada de tensión durante la exposición.

El género

No es sorprendente que se observen diferencias en la reacción al calor de hombres y mujeres, ya que difieren en ciertas características que pueden influir en la transferencia del calor, como la superficie, la relación entre peso y altura, el grosor de las capas aislantes de grasa cutánea y la capacidad física de producir trabajo y calor (capacidad aeróbica \approx tasa máxima de consumo de oxígeno) (Nielsen, 1998). Por lo general las mujeres muestran mayores dificultades para soportar la sobrecarga calórica que los hombres, sobre todo cuando están embarazadas. La menor capacidad cardiovascular de la mujer hace que se aclimate peor. Su temperatura de la piel, la capacidad evaporativa y su metabolismo son ligeramente inferiores de las de los hombres.

Son difícilmente demostrables las diferencias en la respuesta al estrés térmico entre hombres y mujeres, debido a que la respuesta al calor puede estar enmascarada por la condición física y el nivel de aclimatación. Existen estudios en los que se ha observado infertilidad temporal para hombres y mujeres cuando la temperatura interna alcanza los $38\text{ }^\circ\text{C}$. También se ha observado que durante el primer trimestre de embarazo existe riesgo de malformación en el feto cuando la temperatura interna de la madre excede los $39\text{ }^\circ\text{C}$ en un periodo prolongado (Monroy y Luna; 2011).

Aclimatación

La aclimatación al calor es la adaptación a condiciones microclimáticas calurosas y se adquiere en un tiempo entre 7 y 14 días, y quizás más, de exposición a las mismas. No obstante, ni una aclimatación “perfecta” puede garantizar que una persona esté totalmente protegida en situaciones extremas. En la mayoría de las situaciones, la aclimatación puede conseguirse mediante la incorporación gradual del trabajador a la tarea expuesta al calor (Nunneley; 1998). La aclimatación es específica para unas determinadas condiciones ambientales y de ropa, por lo que no se garantiza la respuesta cuando se cambian dichas condiciones (Monroy y Luna; 2011).

Cuando una persona se expone inicialmente a un ambiente caluroso, se manifiesta bruscamente en ella una tensión calórica superior a la que experimenta una persona aclimatada: su temperatura rectal y su frecuencia cardíaca sufren aumentos rápidos y muy pronunciados, se presentan malestares que pueden llegar a ser muy severos hasta alcanzar sensaciones de angustia. Sin embargo, según el organismo esté sometido a actividades físicas consecutivas bajo exposición al calor, se efectúan paulatinamente determinados ajustes, fundamentalmente durante los primeros 4-7 días, en los mecanismos psicológicos y fisiológicos de la termorregulación: el sistema cardiovascular comienza a adaptarse a las nuevas condiciones mejorando la capacidad de abastecer de sangre a los capilares de la piel, por lo que la eficiencia sudorativa del sujeto se incrementa con menos pérdidas de sal, con lo cual la temperatura rectal y la frecuencia cardíaca comienzan a disminuir pues el volumen de eyección sistólica aumenta (Mondelo et al; 2005). Tras 7-14 días puede establecerse que el organismo se ha aclimatado (Nunneley; 1998). Sin embargo aunque la aclimatación se produce rápidamente durante el periodo de exposición al calor, también se pierde muy rápidamente cuando se interrumpe la exposición (una o dos semanas sin exposición requieren de 4 a 7 días para volver a recuperar la aclimatación) (Monroy y Luna; 2011).

Las personas expuestas repetidamente al calor lo tolerarán mejor al cabo de tan solo unos días. Se aclimatan. La tasa de sudoración aumenta y el mayor enfriamiento de la piel reduce la temperatura interna y la frecuencia cardíaca durante el trabajo en las mismas condiciones. Por consiguiente, la aclimatación artificial de los trabajadores cuando se prevé su exposición a elevadas temperaturas (brigadas contra incendios, personal de rescate, personal militar) tendrá probablemente un efecto beneficioso para reducir el estrés.

5. Evaluación del estrés por calor. Índices de cálculo

Los índices de estrés por calor proporcionan herramientas para evaluar ambientes calurosos y estimar el estrés térmico al que pueden verse expuestos los trabajadores. Los valores límite basados en los índices de estrés por calor indicarán cuando este estrés puede llegar a ser inaceptable.

Un índice de estrés por calor es un único número que integra los efectos de seis parámetros básicos en cualquier ambiente térmico al que puede verse expuesto un ser humano, de tal manera que su valor varía dependiendo del estrés térmico experimentado por la persona expuesta a un ambiente caluroso. El valor del índice (medido o calculado) puede utilizarse para diseñar puestos de trabajo o prácticas de trabajo y establecer unos límites de seguridad. Se han

realizado numerosas investigaciones para determinar el índice definitivo de estrés por calor y no existe acuerdo sobre cuál es el mejor de todos ellos (Parsons, 1998).

La mayoría de los índices de estrés por calor consideran, ya sea directa o indirectamente, que el principal factor de estrés para el organismo es el relacionado con la sudoración. Por ejemplo, cuanto más sudor tenga que perderse para mantener el equilibrio térmico y la temperatura corporal interna, mayor será el estrés impuesto al organismo. Para que un índice del estrés por calor refleje el ambiente térmico humano y sirva para predecir el estrés por calor, se precisa un mecanismo que estime la capacidad de una persona para, a través de la sudoración, perder calor en un ambiente caluroso.

Los índices basados en la evaporación del sudor al ambiente son útiles cuando las personas mantienen la temperatura corporal interna principalmente a través de la sudoración. En general, se dice que estas condiciones están en la *zona prescriptiva* (OMS, 1969). Así, la temperatura corporal interna permanece relativamente constante, mientras que la frecuencia cardíaca y el nivel de sudoración aumentan con el estrés por calor. En el límite superior de la zona prescriptiva (LSZP), la regulación térmica es insuficiente para mantener el equilibrio térmico y la temperatura corporal aumenta. Se denomina *zona de urgencia ambiental* (OMS 1969). En esta zona, el almacenamiento de calor está relacionado con la temperatura corporal interna y puede utilizarse como un índice para determinar los tiempos de exposición permisibles (p. ej., basados en un límite de seguridad establecido para mantener una temperatura “interior” de 38 °C).

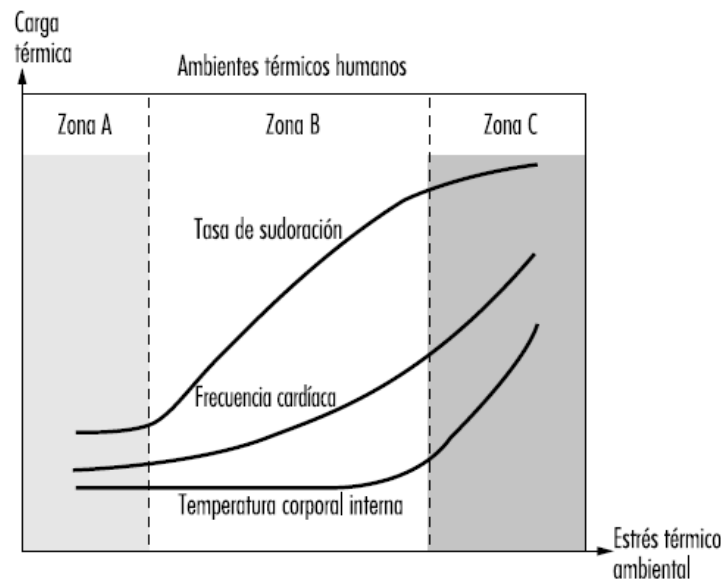


Figura 8. Variación de la carga térmica con niveles crecientes de estrés térmico ambiental (OMS, 1969)

Los índices de estrés por calor pueden clasificarse como *racionales*, *empíricos* o *directos*. Los índices racionales se basan en cálculos para los que se utiliza la ecuación del equilibrio térmico; los índices empíricos se basan en el uso de ecuaciones obtenidas a partir de las respuestas fisiológicas de los seres humanos (frecuencia cardíaca y temperatura corporal); y los índices directos se basan en la medición (normalmente de la temperatura) de instrumentos utilizados para simular la respuesta del cuerpo humano.

5.1 Índices racionales

Cualquiera de los índices de estrés por calor se determinan como la proporción entre la evaporación necesaria para mantener el equilibrio térmico (E_{req}) y la evaporación máxima que podría conseguirse en ese ambiente (E_{max}), expresada como porcentaje (Belding y Hatch 1955).

5.1.1 Índice de sobrecarga calórica (Heat Stress Index)

El HSI (Belding y Hatch 1955), está relacionado con el estrés, fundamentalmente en términos de sudoración corporal, para valores de entre 0 y 100. Con un $HSI = 100$, la evaporación necesaria es la máxima posible y representa el límite superior de la zona prescriptiva. Con un $HSI > 100$, se almacena calor en el organismo y los tiempos de exposición permisibles se calculan en función de un aumento de 1,8 °C de la temperatura interna del organismo. Con un $HSI < 0$ existe un ligero estrés por calor. Se asigna un límite superior de 390 W/m² a E_{max} (sudoración de 1 l/h como la máxima tasa de sudoración mantenida durante 8 horas), se hacen supuestos sencillos sobre los efectos de la ropa (camisa de manga larga y pantalones) y se supone que la temperatura cutánea se mantiene constante a 35 °C.

Tabla 7. Ecuaciones utilizadas para calcular el índice de estrés por calor (HSI) y los tiempos de exposición permisibles (AET)

		Con ropa	Sin ropa
(1) Pérdida por radiación (R)	$R = k_1(35 - t_r) \text{ Wm}^{-2}$	para $k_1 = 4,4$	7,3
(2) Pérdida por convección (C)	$C = k_2 \cdot v^{0,6}(35 - t_a) \text{ Wm}^{-2}$	para $k_2 = 4,6$	7,6
(3) Pérdida máxima por evaporación (E_{max})	$E_{max} = k_3 \cdot v^{0,6}(56 - P_a) \text{ Wm}^{-2}$ (límite superior de 390 Wm ⁻²)	para $k_3 = 7,0$	11,7
(4) Pérdida requerida por evaporación (E_{req})	$E_{req} = M - R - C$		
(5) Índice de estrés por calor (HSI)	$HSI = \frac{(E_{req})}{(E_{max})} \times 100$		
(6) Tiempo de exposición permisible (AET)	$AET = \frac{2440}{(E_{req} - E_{max})} \text{ mins}$		

donde: M = calor metabólico; t_a = temperatura del aire; t_r = temperatura radiante; P_a = presión parcial del vapor; v = velocidad del aire.

Tabla 8. Interpretación de los valores del índice de estrés por calor (HSI)

HSI	Efecto de la exposición durante ocho horas
-20	Estrés por calor leve (p. ej., durante el periodo de recuperación de la exposición al calor).
0	No se produce estrés térmico
10-30	Estrés por calor leve o moderado. Ligero efecto en el trabajo físico, pero posible efecto en el trabajo cualificado
40-60	Estrés por calor intenso, que supone un riesgo para la salud a no ser que la persona esté en muy buena forma física. Necesidad de aclimatación
70-90	Estrés por calor muy intenso. El personal debe ser seleccionado mediante un examen médico. Asegurar un consumo adecuado de agua y sal
100	Estrés máximo tolerado diariamente por hombres jóvenes en buena forma física y aclimatados
Más de 100	Tiempo de exposición limitado por el aumento de la temperatura corporal interna

5.1.2 Tasa de sudoración requerida (SW_{req})

La tasa de sudoración requerida (Vogt et al.; 1981).supuso una mejora teórica y práctica incorporada al HSI (*Required Sweat rate*). Es un índice que calcula la sudoración necesaria para conseguir el equilibrio térmico a partir de una ecuación perfeccionada del equilibrio térmico, pero lo más importante es que constituye un método práctico para interpretar los cálculos comparando lo que se necesita con lo que es fisiológicamente posible y aceptable en el ser humano. Los extensos debates y las evaluaciones industriales y de laboratorio de este índice tuvieron como resultado su aceptación como Norma Internacional ISO 7933 (1989b).

Al igual que los otros índices racionales, SW_{req} se deriva de los seis parámetros básicos: temperatura del aire (T_a), temperatura radiante (T_r), velocidad del aire con esa humedad relativa (v), aislamiento de la ropa (I_{cl}), tasa metabólica (M) y trabajo externo (W). Son necesarios también los valores de la superficie efectiva de radiación para distintas posturas (sentado = 0,72, de pie = 0,77). A partir de estos valores, la evaporación necesaria se calcula como:

$$E_{req} = M - W - C_{res} - E_{res} - C - R$$

Existen ecuaciones para cada componente (véanse la figura 9 y tabla 9). La temperatura cutánea media se calcula a partir de una ecuación de regresión lineal múltiple o se supone un valor de 36 °C. A partir de la evaporación requerida (E_{req}), la evaporación máxima (E_{max}) y la eficiencia evaporativa de la sudoración (r), se calcula lo siguiente:

$$\text{Humedad cutánea requerida } W_{req} = E_{req}/E_{max}$$

$$\text{Tasa de sudoración requerida } SW_{req} = E_{req}/r \text{ (W/m}^2\text{)}$$

Para realizar una interpretación práctica de los valores calculados, se utilizan valores de referencia en términos de lo que es aceptable y factible (véase la tabla 10). En primer lugar se realiza una predicción de la humedad de la piel (w_p), la tasa de evaporación (E_p) y la tasa de sudoración (SW_p).

Básicamente, si los valores calculados como necesarios son factibles, se consideran valores previstos (p. ej., $SW_p = SW_{req}$). Si no son factibles, pueden tomarse como valores máximos (p. ej., $SW_p = SW_{max}$). En el diagrama de flujos de decisión se ofrecen más detalles (véase la Figura xx). Si la tasa de sudoración requerida puede conseguirse sin que se produzca una pérdida inadmisibles de agua, no existe ningún límite en la exposición al calor durante un turno de trabajo de 8 horas. De lo contrario, se calculan las exposiciones de duración limitada (*EDL*) a partir de:

Cuando $E_p = E_{req}$ y $SW_p = D_{max}/8$, entonces $EDL = 480$ minutos y SW_{req} puede utilizarse como índice de estrés por calor. Si lo anterior no se cumple, entonces:

$$EDL 1 = 60Q_{max}/(E_{req} - E_p) \text{ y } EDL 2 = 60D_{max}/SW_p$$

La interpretación de los valores calculados según el apartado anterior se basa en:

Dos criterios de estrés:

1. La máxima humedad de la piel, w_{max}
2. La máxima sudoración, SW_{max} (W/m²), (g/h)

Dos límites de tensión térmica:

1. La máxima acumulación de calor, Q_{max} (Wh/m²)

2. La máxima pérdida de agua, D_{\max} (g), (Wh/m^2)

Obviamente, para cualquier persona:

- la sudoración requerida SW_{req} , no puede exceder a la sudoración máxima SW_{\max}
- la humedad requerida de la piel w_{req} , no puede exceder a la humedad máxima w_{\max}
- estos valores máximos están en función de la aclimatación del sujeto.

Supuestos de trabajo

- Cuando la humedad requerida de la piel es menor que la humedad máxima admisible, y la sudoración requerida menor que la tasa máxima de sudoración, el cuerpo está en equilibrio térmico y los valores esperados son:
 - $w_p = w_{req}$
 - $E_p = E_{req}$
 - $SW_p = SW_{req}$
- Cuando, por el contrario, la humedad requerida de la piel excede a la humedad máxima, se produce acumulación de calor en el organismo:
 - $w_p = w_{\max}$
 - $E_p = w_p E_{\max}$
 - $SW_p = E_p / r_p$
- r_p es la eficiencia evaporativa de la sudoración correspondiente a w_p .
- Si la tasa de sudoración prevista es superior que la tasa de máxima de sudoración, debe recalcularse la humedad prevista w_p , y la eficiencia de la evaporación r_p , tal como sigue:
 - $w_p E_{\max} = SW_{\max} r_p$
- teniendo en cuenta la relación entre w_p y r_p
 - $r_p = 1 - (w_p^2/2)$
- por tanto:
 - $E_p = w_p E_{\max}$ (W/m^2)
 - $SW_p = SW_{\max}$ (W/m^2)
- La exposición a condiciones de estrés comporta dos tipos importantes de riesgo: de una parte la deshidratación, y de otra, el golpe de calor, de ahí que se deba establecer un tiempo máximo de permanencia en una situación dada, que se denomina duración límite de exposición (DLE).
- El tiempo máximo de exposición puede determinarse como función de los valores máximos de almacenamiento de calor (Q^{\max}) y de pérdida hídrica (D^{\max}).
- Cuando la evaporación prevista es igual a la requerida y la sudoración prevista es inferior a la octava parte del límite máximo de pérdida de agua :
 - $E^p = E^{req}$
 - $SW^p < D^{\max}/8$
- Entonces no hay límite de tiempo de exposición en las 8 horas de la jornada laboral. En esta situación, SW^p puede utilizarse como índice comparativo para las condiciones de estrés térmico.
- Si alguna de éstas dos condiciones no se cumple, se deberá calcular la duración límite de exposición (DLE).

Tabla 9. Ecuaciones utilizadas para el cálculo del índice SW_{req} y en el método de evaluación de ISO 7933 (1989b).

$$SW_{req} = \frac{E_{req}}{r_{req}}$$

$$E_{req} = M - W - C_{res} - E_{res} - C - R$$

$$C_{res} = 0,0014 M (35 - t_a)$$

$$E_{res} = 0,0173 M (5,624 - P_a)$$

$$C = h_c \cdot F_{cl} (\bar{t}_{sk} - \bar{t}_a)$$

$$R = h_r \cdot F_{cl} (\bar{t}_{sk} - \bar{t}_r)$$

$$w = E/E_{max}$$

$$r = 1 - w^2/2$$

$$h_c = 2,38 [\bar{t}_{sk} - \bar{t}_a]^{0,25} \text{ para la convección natural}$$

$$= 3,5 + 5,2 v_{ar}, \text{ para } v_{ar} < 1 \text{ ms}^{-1}$$

$$= 8,7 v_{ar}^{0,6}, \text{ para } v_{ar} > 1 \text{ ms}^{-1}$$

$$v_{ar} = v_a + 0,0052(M - 58)$$

$$h_r = (\sigma E_{sk} \cdot A_r / A_0) \frac{[(\bar{t}_{sk} + 273)^4 - (\bar{t}_r + 273)^4]}{(\bar{t}_{sk} - \bar{t}_r)}$$

$$F_{cl} = \frac{1}{\left[(h_c + h_r) / f_{cl} + \frac{1}{f_{cl}} \right]}$$

$$f_{cl} = 1 + 1,97 /_{cl}$$

$$E_{max} = \frac{(P_{sk,s} - P_a)}{R_1}$$

$$R_1 = \frac{1}{(h_e - F_{pd})}$$

$$h_e = 16,7 h_c$$

$$F_{pd} = \left\{ 1 + 2,22 h_c \left[\frac{/__{cl} - \left(1 + \frac{1}{f_{cl}} \right)}{h_c - h_r} \right] \right\}^{-1}$$

$$\bar{t}_{sk} = 30,0 + 0,093 t_a + 0,045 \bar{t}_r - 0,571 v_a + 0,254 P_a + 0,00128 M - 3,57 /_{cl}$$

o $\bar{t}_{sk} = 36 \text{ }^\circ\text{C}$, para una aproximación o cuando los valores superan los límites para los que se derivó la ecuación.

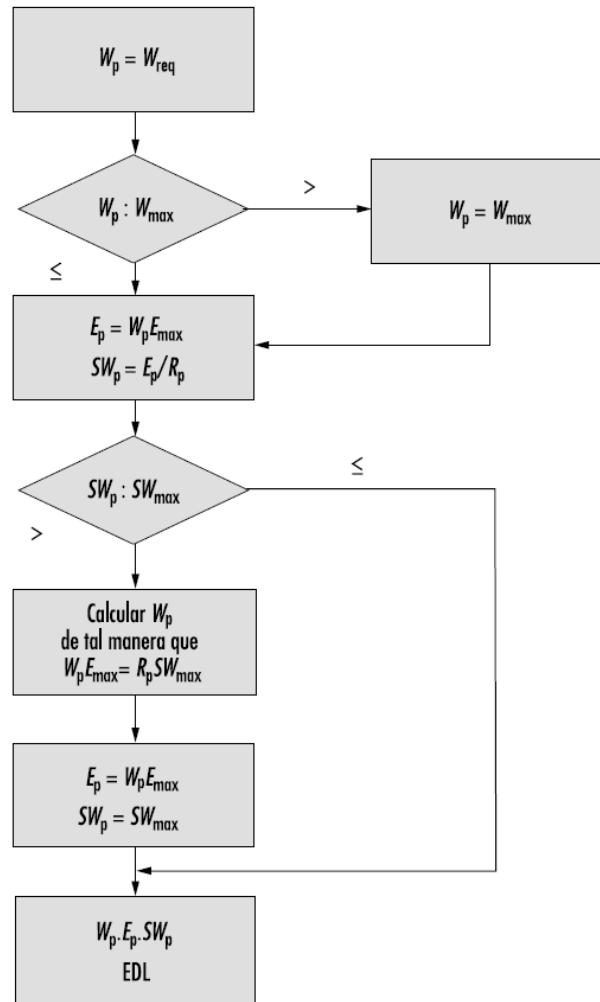
Figura 9. Diagrama de flujos de decisión para SW_{req} (tasa de sudoración requerida).

Tabla 10. Valores de referencia para los criterios de estrés y carga térmica (ISO 7933, 1989b).

Criterio	Personas no aclimatadas		Personas aclimatadas			
	Alarma	Peligro	Alarma	Peligro		
Humedad máxima de la piel						
w_{max}	0,85	0,85	1,0	1,0		
Tasa de sudoración máxima						
Reposo ($M < 65 \text{ Wm}^{-2}$)	SW_{max}	$\text{Wm}^{-2} \text{ gh}^{-1}$	100	150	200	300
			260	390	520	780
Trabajo ($M \geq 65 \text{ Wm}^{-2}$)	SW_{max}	$\text{Wm}^{-2} \text{ gh}^{-1}$	200	250	300	400
			520	650	780	1.040
Acumulación máxima de calor						
Q_{max}	Whm^{-2}		50	60	50	60
Pérdida hídrica máxima						
D_{max}	$\text{Whm}^{-2} \text{ g}$		1.000	1.250	1.500	2.000
			2.600	3.250	3.900	5.200

Si la evaporación requerida no puede alcanzarse, la diferencia entre E_{req} y E_p representa la acumulación de calor. A fin de no sobrepasar más allá de 0,8 a 1°C la temperatura interna de la persona, parámetros fijados por los criterios de alerta y peligro, la acumulación de calor (Q) debe limitarse entre 50 y 60 Wh/m². La duración límite de exposición (DLE), en minutos, viene determinada por la expresión:

$$DLE1 = 60 Q_{max} / (E_{req} - E_p) \text{ (minutos)}$$

Si, por otra parte, la sudoración prevista supone una pérdida hídrica muy importante, el tiempo de exposición viene dado por la siguiente expresión:

$$DLE2 = 60 D_{max} / SW_p \text{ (minutos)}$$

D_{max} es el valor máximo de pérdida hídrica (Wh/m²)

La DLE menor es la que se toma como tiempo límite de exposición.

En situaciones de trabajo para las cuales:

1. la tasa máxima de evaporación, E_{max} , es negativa, tal que se alcanza la condensación del vapor de agua en la piel, y/o
2. el tiempo de exposición permitido es menor de 30 minutos,

se tomarán medidas especiales de precaución, así como la vigilancia de los parámetros fisiológicos de los trabajadores.

5.1.3 Índice de sobrecarga térmica (IST)

El Índice de Sobrecarga Térmica (Malchaire et al. 2001).se basa, como en el caso del índice de sudoración requerida, en la resolución de la ecuación del balance térmico

$$E + S = M - W - C_{res} - E_{res} - C - R$$

Los términos de intercambio de calor a través de la respiración se calculan mediante las siguientes ecuaciones, que difieren de las ya utilizadas en el cálculo del índice de sudoración requerida, y que dependen del metabolismo (M), la presión parcial del vapor de agua (p_a) y la temperatura del aire (t_a):

$$C_{res} = 0,00152 M (28,56 + 0,885t_a + 0,641p_a)$$

$$E_{res} = 0,00127 M (59,34 + 0,53t_a - 11,63p_a)$$

Una diferencia importante entre la nueva metodología (IST) respecto al método del Índice de Sudoración Requerida (SW_{req}) se encuentra a la hora de calcular la Evaporación requerida (E_{req}), es decir el flujo de calor por evaporación del sudor necesario para mantener el equilibrio térmico del cuerpo y por lo tanto para que el almacenamiento de calor sea nulo ($S = 0$). La nueva interpretación supone que incluso en un ambiente térmico neutro, existe un almacenamiento de calor asociado (dS_{eq}) al incremento de temperatura interna, ya que incluso en ambientes neutros debe alcanzar un valor de equilibrio ($T_{cr, eq}$). De la ecuación del balance térmico se calcula la evaporación del sudor requerida (E_{req}) como sigue:

$$E_{req} = M - W - C_{res} - E_{res} - C - R - dS_{eq}$$

Por otra parte y como sucedía al utilizar el SW_{req} , la humedad (o mojadura) requerida de la piel (w_{req}) corresponde a la relación entre el flujo de calor por evaporación y el flujo máximo de calor por evaporación en la superficie de la piel:

$$W_{req} = E_{req} / E_{max}$$

La sudoración requerida (SW_{req}) se obtiene al dividir el flujo de calor por evaporación requerido por la eficiencia evaporativa (r_{req}) o fracción de sudor que condensa debido a variaciones pronunciadas de la humedad local de la piel:

$$SW_{req} = E_{req} / r_{req}$$

Cuando la evaporación de sudor requerida (E_{req}) es mayor que la (E_p) se produce un almacenamiento de calor (S) en el organismo (además de dS_{eq}), que se determina a partir de la diferencia entre la evaporación del sudor requerida para que se cumpla el balance térmico (E_{req}), la evaporación previsible (E_p) y las pérdidas por respiración (E_{res}). Estos términos adquieren importancia en el método, ya que a partir de la determinación del almacenamiento de calor se estiman la temperatura interna (t_{cr}) y, posteriormente la temperatura rectal (t_{re}), cuyo valor determina el tiempo máximo de permanencia. Dicho de otro modo el tiempo máximo de permanencia es el tiempo necesario para que dicha temperatura rectal alcance el límite establecido en la norma (38 °C).

Incorporación del aislamiento dinámico de la ropa

La actividad (movimiento del cuerpo) y la ventilación modifican las características de aislamiento de la ropa y de la capa de aire adyacente, debido a esto, es necesario introducir una corrección en el coeficiente de transferencia de calor por convección, al calcular el término de convección.

$$C = h_{cdyn} f_{cl} (t_{sk} - t_a)$$

f_{cl} es el factor de área de la ropa y t_{sk} es la temperatura media de la piel, como se definía ya al desarrollar el SW_{req} , h_{cdyn} es el coeficiente dinámico de transferencia de calor por convección que incluye un factor de corrección para el efecto del aislamiento que se produce en función de las características de la ropa que se utiliza (aislamiento estático), pero además, al introducir el concepto de aislamiento dinámico, se incorporan las variables de movimiento del individuo (ángulo y velocidad con la que se mueve) y del movimiento del aire (velocidad del aire). La velocidad con que el trabajador se mueve, a falta de datos, se estima como una función de la actividad (potencia metabólica, M).

La evaporación máxima (E_{max}) es el flujo máximo de calor por evaporación que puede darse en la superficie de la piel en el caso hipotético de que la piel estuviera completamente mojada. Su expresión matemática, ya empleada en el método SW_{req} , es $E_{max} = (P_{sk,s} - P_a) / Rt_{dyn}$, siendo $P_{sk,s}$ la presión de vapor de agua saturado a la temperatura de la piel, pero ahora se incorpora una modificación en la resistencia dinámica total a la evaporación de la ropa y la capa límite de aire (Rt_{dyn}), que se calcula teniendo en cuenta la influencia del movimiento del aire y del cuerpo, así como también el índice de permeabilidad de la ropa. Este último, representa la resistencia del atuendo al paso del vapor de agua o sea la resistencia a la evaporación, en este caso del sudor. El valor que se toma en ausencia de datos más concretos, es un valor medio para tejidos estándar (no ropa especial de trabajo), $i_{mst} = 0,38$.

Factor de corrección para prendas reflectantes

El flujo de calor por radiación en la superficie de la piel, cuya expresión es $R = h_r f_{cl} (t_{sk} - t_r)$ incluye el coeficiente de transferencia de calor por radiación (h_r), en el que ahora se introduce

un factor de corrección F_{clR} , que tiene en cuenta el efecto de las prendas de vestir reflectantes. Su expresión matemática es:

$$F_{clR} = (1 - A_p) \cdot 0,93 + A_p \cdot F_r$$

Siendo F_{clR} el factor de reducción del intercambio de calor por radiación, debido a la ropa, A_p la fracción de la superficie del cuerpo cubierta con prendas reflectantes y F_r es la emisividad de la prenda reflectante.

Evolución temporal de las variables corporales

En el caso de condiciones de trabajo intermitentes, el método del Índice de Sudoración Requerida (ISR) utilizaba los valores medios obtenidos a partir de las diferentes secuencias, de E_{req} y de E_{max} , ponderados en el tiempo. El método del Índice de Sobrecarga Térmica (IST) permite predecir la tasa de sudoración, temperatura de la piel, interna y rectal en cada instante (minuto a minuto), teniendo siempre en cuenta la exposición anterior y efectuando ponderaciones exponenciales de algunas de las variables.

Así por ejemplo calcula la Temperatura de la piel en el instante de tiempo i a partir de la temperatura de la piel en el instante $i-1$ y de la temperatura media de la piel ($T_{sk,eq}$), mediante la ecuación:

$$T_{sk,i} = (e^{-1/k})T_{sk,i-1} + (1-e^{-1/k})T_{sk,eq}$$

donde $T_{sk,i}$ y $T_{sk,i-1}$ = Temperatura de la piel en el instante de tiempo i y $i-1$ y $T_{sk,eq}$ = Temperatura de la piel en equilibrio.

La temperatura media de la piel ($T_{sk,eq}$) se halla en función de las variable termohigrométricas propias de la situación de trabajo, temperatura del aire (t_a), temperatura radiante (t_r), velocidad del aire (v), presión parcial del vapor de agua (p_a), actividad metabólica (M), temperatura rectal (T_{re}) y aislamiento térmico de la ropa (I_{cl}). Las ecuaciones que determinan la temperatura media de la piel varían según que el valor de I_{cl} sea menor de 0,2 clo, entre este valor y 0,6 clo y mayor de 0,6 clo.

La Tasa de sudoración prevista también se obtiene de una ecuación de ponderación exponencial, que para el instante i es

$$SW_{p,i} = (e^{-1/k}) SW_{p,i-1} + (1-e^{-1/k}) SW_{req}$$

Donde $SW_{p,i}$ es la Tasa de sudoración prevista en el instante de tiempo i , y SW_{req} es la Tasa de sudoración requerida. En las ecuaciones exponenciales anteriores, k es la constante de tiempo asociada, a la que, en la metodología expuesta en la UNE ISO 7933, se da un valor $k = 3$ en el caso de la temperatura de la piel y $k = 10$, cuando se calcula la tasa de sudoración.

Distribución del almacenamiento de calor en el cuerpo

El modelo que propone el método IST asume que, en el interior del cuerpo, la temperatura varía linealmente desde T_{sk0} (temperatura de la piel inicial) a T_{cr0} (temperatura interna inicial) inicialmente y desde T_{sk} a T_{cr} al final del periodo de tiempo de un minuto. La temperatura interna (T_{cr}) se calcula teniendo en cuenta la distribución entre el interior y la capa de piel del calor almacenado en el cuerpo:

$$T_{cr,i} = \frac{1}{1 - \frac{\alpha}{2}} \left[\frac{dSi}{c_p \cdot w_b} + T_{cr,i-1} - \frac{T_{cr,i-1} - T_{sk,i-1}}{2} \cdot \alpha_{i-1} - T_{sk,i} \frac{\alpha_i}{2} \right]$$

$T_{cr,i}$ = Temperatura interna en el instante i

c_p = calor específico del aire seco, a presión constante

w_b = masa del cuerpo

$T_{cr,i-1}$ = Temperatura interna en el instante $i-1$

El factor de ponderación utilizado $(1-\alpha)$ representa la fracción de masa corporal que se encuentra a la temperatura media interna, y se calcula así:

$$(1 - \alpha) = 0,7 + 0,09 (T_{cr} - 36,8)$$

Que está limitada por los valores:

$$\alpha = 0,7 \text{ para } T_{re} < 36,8^\circ\text{C}$$

$$\alpha = 0,9 \text{ para } T_{re} > 39^\circ\text{C}$$

El modelo de sobrecarga térmica utiliza la temperatura rectal como criterio de sobrecarga fisiológica limitándola a 38°C . A partir de ese valor se considera que existe riesgo por sobrecarga térmica. La temperatura rectal se obtiene minuto a minuto mediante una fórmula empírica que depende directamente de la temperatura interna en un instante determinado y de la temperatura rectal del instante anterior.

$$T_{re,i} = T_{re,i-1} + \left[T_{cr,i-1} \frac{2T_{cr,i} - 1,962T_{cr,i-1} - 1,31}{9} \right]$$

Criterios de valoración

Los individuos aclimatados son capaces de transpirar más rápidamente, con más abundancia y más uniformemente sobre la superficie de la piel, que los no aclimatados. En consecuencia, los individuos aclimatados tienen menor almacenamiento de calor y esfuerzo cardíaco (y menor temperatura interna), para una determinada situación. Además, pierden menos sales por el sudor, por lo que dichos individuos son capaces de resistir una mayor pérdida de agua. Con el fin de considerar las diferencias en la respuesta de los individuos aclimatados y no aclimatados se consideran, en ambos casos, valores de referencia máximos de la humedad o mojadura de la piel y de la sudoración.

Tabla 11. Valores máximos para la humedad de la piel y la tasa de sudoración según ISO 7993:2005.

Variable	Individuos no aclimatados	Individuos aclimatados
Mojadura máxima de la piel (w_{max})	0,85	1
Tasa máxima de sudoración (SW_{max})	$(M-32) \times A_{Du}$	$1,25 (M-32) \times A_{Du}$
A_{Du} = área de la superficie de Du Bois del cuerpo, se obtiene de la expresión, $A_{Du} = 0,202 \times (\text{peso en Kg})^{0,425} \times (\text{altura en m})^{0,725}$. SW_{max} debe estar comprendida entre 250 y 400 W/m ²		

El método fija valores máximos admisibles para la temperatura rectal de 38 °C, (en la metodología del ISR se limitaba el incremento de la temperatura interna) y para la pérdida de agua por deshidratación suponiendo que los trabajadores pueden beber agua durante el trabajo a voluntad. Para un individuo medio la pérdida de agua corporal máxima admisible ($D_{\max50}$) es del 7% de su peso total. Esta limitación se considera suficientemente preventiva para el 50% de la población. Una limitación más conservadora, es la del 5% del peso corporal total, que supone proteger al 95% de la población trabajadora y por tanto a personas de respuesta más sensible a la deshidratación ($D_{\max95}$). Cuando la rehidratación del trabajador durante la exposición al calor no es posible se debe limitar D_{\max} al 3% del peso corporal.

5.2 Índices empíricos

5.2.1 Temperatura efectiva y temperatura efectiva corregida

El índice de Temperatura Efectiva (Houghton y Yaglou 1923) se creó inicialmente para proporcionar un método de determinación de los efectos relativos de la temperatura del aire y la humedad en la sensación de bienestar. Tres personas juzgaron cuál de dos cámaras climatizadas era más cálida caminando por ellas. Utilizando diferentes combinaciones de temperatura y humedad del aire (y después otros parámetros), se determinaron las líneas de bienestar equivalente. Las tres personas describieron sus impresiones inmediatas y se registraron sus respuestas transitorias. El resultado fue que se sobrestimó el efecto de la humedad a temperaturas bajas y se subestimó a temperaturas altas (en comparación con las respuestas en estado estable). Aunque en un principio era un índice de bienestar, la sustitución de la temperatura de bulbo seco por la temperatura del globo negro en los nomogramas de la TE proporcionó la Temperatura Efectiva Corregida (TEC) (Bedford 1940). Los estudios publicados por Macpherson (1960) sugirieron que la TEC predecía los efectos fisiológicos de un aumento de la temperatura radiante media. En la actualidad, la TE y la TEC se utilizan rara vez como índices del bienestar, aunque se han utilizado como índices del estrés por calor.

5.2.2 Tasa de sudoración prevista durante cuatro horas

El índice de la tasa de sudoración prevista durante cuatro horas (TSP4) fue propuesto en Londres por Mc Ardle y cols. (1947) y evaluado en Singapur durante 7 años de trabajo resumido por Macpherson (1960). Es la cantidad de sudor secretado por hombres jóvenes aclimatados y en buena forma física, expuestos al ambiente durante 4 horas mientras cargan munición en cañones durante una batalla naval. El número (valor de índice) que por sí sólo resume el efecto de los seis parámetros básicos es la cantidad de sudor producido por esa población específica, pero debe utilizarse como un valor de índice y no como una indicación de la cantidad de sudor en un determinado grupo de interés.

5.2.3 Predicción de la frecuencia cardíaca como índice

Givoni y Goldman (1973) propusieron ecuaciones para la variación de la frecuencia cardíaca con el tiempo y correcciones para tener en cuenta el grado de aclimatación de las personas:

$$FC = 22,4 + 0,18M + 0,25 (5T_a + 2P_a)$$

donde M es la tasa metabólica W/m^2 , T_a es la temperatura del aire en °C y P_a es la presión del vapor en Mb. Definen un índice de frecuencia cardíaca (IFC) según la variación de la temperatura rectal de equilibrio prevista

$$T_{ref} = 36,75 + 0,004(M - W_{ex}) + (0,025/clo) (T_a - 36) + 0,8e0,0047 (E_{req} - E_{max}).$$

IFC es pues:

$$IFC = 0,4M + (2,5/clo) (T_a - 36) + 80e^{0,0047} (E_{req} - E_{max})$$

donde M = tasa metabólica (vatios), W_{ex} = trabajo mecánico(vatios), clo = aislamiento térmico de la ropa, T_a = temperatura del aire (°C), E_{req} = carga térmica metabólica y ambiental total (vatios), E_{max} = capacidad de enfriamiento por evaporación de la ropa y el ambiente (vatios). La frecuencia cardíaca de equilibrio (FC_f en pulsaciones por minutos) viene dada por:

$$HR_f = 65 + 0,35 (IFC - 25) \text{ para } IFC \leq 225$$

es decir, existe una relación lineal (entre la temperatura rectal y la frecuencia cardíaca) para frecuencias cardíacas de hasta unos 150 latidos por minuto. Para $IFC > 225$:

$$FC_f = 65 + (FC_f - 65) (1 - e^{-3t})$$

es decir, existe una relación exponencial a medida que la frecuencia cardíaca se aproxima al máximo, donde:

FC_f = frecuencia cardíaca de equilibrio (ppm), 65 = supuesta frecuencia cardíaca en reposo y en condiciones de bienestar (ppm), y t = tiempo en horas.

5.2.4 Índice de tensión fisiológica

El índice de tensión fisiológica (PSI), (Physiological Strain Index) (Moran et al, 1998) se basa en las medidas de temperatura rectal (T_{re}) y en la frecuencia cardíaca (FC) durante la exposición al calor. Integra estos valores en una ecuación que proporciona un único valor del PSI (de 0 a 10), que da el nivel de tensión fisiológica a la que está sometido el organismo. Para ello se analizaron datos de seis estudios independientes, que contienen ocho bases de datos diferentes, con el fin de evaluar el PSI para diferentes condiciones climáticas, niveles de hidratación, tipos de ropa, intensidades de ejercicio, el sexo y los efectos del envejecimiento.

Asume que el incremento máximo de la temperatura rectal máxima y el aumento de la FC durante la exposición al estrés térmico por el ejercicio es de 3 ° C (36,5°C a 39,5 °C) y 120 latidos / min (60 a 180 latidos / min), respectivamente. T_{re} y la FC tienen asignado el mismo peso en la ecuación:

$$PSI = 5(T_{ret} - T_{re0}) \cdot (39,5 - T_{re0})^{-1} + 5(HR_t - HR_0) \cdot (180 - HR_0)^{-1}$$

Donde T_{ret} y HR_t son mediciones simultáneas tomadas en cualquier momento t durante la exposición y T_{re0} y HR_0 son las medidas iniciales de la temperatura rectal y la frecuencia cardíaca, respectivamente.

Tabla 12. Nivel de tensión fisiológica por calor PSI en función de los valores obtenidos en la ecuación Moran et al.; 1998).

Strain	PSI
	0
No/little	1
	2
Low	3
	4
Moderate	5
	6
High	7
	8
Very high	9
	10

5.3 Índices directos

5.3.1 Índice de temperatura de globo de bulbo húmedo (WBGT)

El índice de temperatura de globo de bulbo húmedo (Wet Bulb Globe Temperature Index,) es, con diferencia, el más utilizado en todo el mundo. Fue desarrollado durante una investigación realizada por la Marina de Estados Unidos sobre los accidentes por calor que sufría el personal militar (Yaglou y Minard 1957). Los valores límites del WBGT se utilizaron para determinar cuándo los reclutas militares podían recibir instrucción. Se observó que los accidentes por calor y el tiempo perdido por interrupción de la instrucción se reducían cuando se utilizaba el índice WBGT en lugar de tan sólo la temperatura del aire.

El índice WBGT fue adoptado por NIOSH (1972), ACGIH (1990) e ISO 7243 (1989a) y su uso se sigue recomendando hoy en día. En la norma ISO 7243 (1989a), basada en el índice WBGT, se describe un método sencillo de utilizar en ambientes calurosos para establecer un diagnóstico “rápido”. Dicha norma incluye también las especificaciones de los instrumentos de medida, como son los valores límite del WBGT para personas aclimatadas y no aclimatadas .

Para el cálculo del WBGT se utilizan las siguientes expresiones, según sea sin radiación solar (1), o con presencia de radiación solar (2):

$$\text{WBGT} = 0,7 t_{\text{bhn}} + 0,3 t_{\text{g}} \quad (1)$$

$$\text{WBGT} = 0,7 t_{\text{bhn}} + 0,2 t_{\text{g}} + 0,1 t_{\text{a}} \quad (2)$$

siendo:

WBGT: índice de temperatura de globo y de bulbo húmedo, (°C)

t_{bhn} : temperatura de bulbo húmedo natural, (°C)

t_{g} : temperatura de globo, (°C)

t_{a} : temperatura del aire, (°C)

La determinación del valor del índice WBGT requiere del empleo de un termómetro de globo negro, un termómetro de bulbo húmedo natural, y un termómetro de bulbo seco. El termómetro de globo está constituido por un termómetro de mercurio cuyo bulbo se encuentra en el centro de un globo hueco de cobre de 15 cm de diámetro, pintado de negro mate con un coeficiente de emisividad no menor de 0,95, que debe ser expuesto hasta que se estabilice la medida, lo

que usualmente ocurre entre los 20 y los 25 minutos. El termómetro de bulbo húmedo natural es un termómetro de mercurio con un bulbo, de 6 milímetros de diámetro exterior, que está recubierto por una muselina empapada en agua destilada cuyo extremo inferior debe estar inmerso en un recipiente de agua destilada, del que debe sobresalir entre 2 y 3 centímetros. El recipiente que contiene el agua destilada estará diseñado de tal forma que la temperatura del agua en su interior no pueda elevarse como resultado de la radiación del ambiente. La muselina o camiseta de algodón estará siempre empapada, y para iniciar las mediciones tendrá que haber sido mojada al menos 15 minutos antes. El termómetro de bulbo seco se usa únicamente cuando existe radiación solar; consiste en un termómetro cuyo sensor debe estar protegido de la radiación mediante un dispositivo que no impida la libre circulación del aire a su alrededor.

El valor de las mediciones se debe recoger simultáneamente en todos los termómetros, y con las medidas obtenidas se calcula el WBGT con una de las dos ecuaciones (1) y (2) antes indicadas, según el caso.

Cuando el nivel de actividad (M) o el valor del índice WBGT resultante no son constantes en el tiempo, se deben promediar ponderadamente con los tiempos de actividad respectivos según las siguientes ecuaciones (3) y (4):

$$M = [M_1t_1 + M_2t_2 + M_3t_3 + \dots + M_nt_n] / (t_1 + t_2 + t_3 + \dots + t_n) \quad (3)$$

$$WBGT = [t_1WBGT_1 + t_2WBGT_2 + \dots + t_nWBGT_n] / (t_1 + t_2 + \dots + t_n) \quad (4)$$

Para evaluar la situación, según el valor de la carga metabólica (M) de las actividades, se emplea la tabla de la tabla 13 según la norma ISO 7243.

Tabla 13. Valores de referencia de WBGT (ISO 7243).

Metabolismo	Metabolismo, M		Valores máximos WBGT			
	Metabolismo W/m ²	Para una persona de 1,80 m ²	Personas aclimatadas (°C)		Personas no aclimatadas (°C)	
0 (descanso)	M < 65	M < 117	33		32	
1	65 < M < 130	117 < M < 234	30		29	
2	130 < M < 200	234 < M < 360	28		26	
3	200 < M < 260	360 < M < 468	Movimiento aire no sensible 25	Movimiento aire sensible 26	Movimiento aire no sensible 22	Movimiento aire sensible 23
4	M > 260	M > 468	23	25	18	20

NOTA: Estos valores están previstos para una temperatura rectal máxima de 38 °C.

Si se quiere hallar el WBGT de un puesto de trabajo donde el operario permanezca estable, o cuando los parámetros no son constantes en el espacio que rodea al sujeto, es necesario determinar el índice en tres niveles, correspondientes a las alturas de la cabeza, del abdomen y de los tobillos, y promediando los diferentes valores ponderados, según la siguiente proporción:

$$WBGT = [(WBGT_{\text{cabeza}} + 2 WBGT_{\text{abdomen}} + WBGT_{\text{tobillos}})] / 4$$

Los valores límite de referencia dados son válidos para una vestimenta ligera de verano de 0,6 clo, que habitualmente es la que llevan los operarios cuando desarrollan su labor en ambientes calurosos. Si se requiere un traje especial para realizar una actividad determinada y éste es de

más abrigo, o impide la evaporación del sudor o aísla más, la tolerancia del trabajador al calor se reduce. En ese caso habrá que aplicar un coeficiente al valor calculado del WBGT en función de los valores recogidos en la tabla 13.

Tabla 14. *Factores de corrección para vestimentas de trabajo según la American Industrial Hygiene Association (AIHA); disminuir el valor límite en la cantidad indicada en la tabla.*

<i>Tipo de corrección</i>	<i>Valor (clo)</i>	<i>Corrección WBGT</i>
Uniforme de trabajo de verano	0,6	0
Batas de algodón	1,0	-2
Uniforme de trabajo de invierno	1,4	-4
Gortex (protección antihumedad)	1,2	-6

En la evaluación de riesgo por calor se utiliza el método del índice WBGT con el fin de realizar una primera detección de aquellas situaciones en las que puedan existir riesgos por calor. Se trata de una primera aproximación, un método que únicamente discrimina las situaciones que pueden ser peligrosas. Cuando dicho índice WBGT es superior a los límites establecidos es conveniente realizar un análisis más detallado de la situación, empleando una metodología de mayor precisión que informe en profundidad de las condiciones de estrés térmico. El Método del índice de Sobrecarga Térmica (IST) que describe la UNE-EN ISO 7933 permite identificar (y priorizar) las causas de la exposición, calcular el tiempo máximo de permanencia en esas condiciones y organizar el trabajo en etapas de forma que se puedan compensar periodos de actividad

6. Efectos sobre la salud

A través de la evolución, el cuerpo humano ha desarrollado un sistema termorregulador capaz de contrarrestar, los cambios exteriores de temperatura. El sistema termorregulador consta, de forma resumida, de dos elementos, siendo el primero de ellos el núcleo central, constituido por órganos vitales como el cerebro, el corazón, los pulmones y el sistema digestivo, mientras que el segundo elemento sería la cáscara periférica determinada por músculos, la capa de grasa y la piel. Cuando el calor cedido por el organismo al medio ambiente es inferior al calor recibido o producido por el metabolismo basal más el metabolismo de trabajo, el organismo tiende a aumentar su temperatura, y para evitar esta hipertermia (aumento de la temperatura del cuerpo), pone en marcha múltiples mecanismos:

- Vasodilatación periférica: aumento del intercambio de calor, gracias al aumento de la circulación sanguínea periférica que puede llegar a ser de $2,6 \text{ litros} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$.
- Activación de los glándulas sudoríparas: aumento del intercambio de calor por cambio de estado del sudor de líquido a vapor (Existen unas 2,5 millones de glándulas sudoríparas que pueden llegar a perder 1.5 litros/hora). Por cada gramo de sudor que es evaporado de la piel, el cuerpo se beneficia de un enfriamiento equivalente a 600 calorías.
- Cambio electrolítico de sudor: La pérdida de ClNa puede llegar a $15 \text{ gr} \cdot \text{litro}^{-1}$.

El estrés térmico por calor genera varios tipos de riesgos que pueden originar diversos daños a la salud. En algunas ocasiones estos riesgos pueden presentarse muy rápidamente, **de repente**, y tener desenlaces rápidos e irreversibles. La mayoría de las veces las causas del estrés térmico son fácilmente reconocibles y la posibilidad de que se produzcan daños es igualmente fácilmente previsible. En otras circunstancias, en las que las condiciones ambientales no son extremas, el estrés térmico por calor puede pasar inadvertido y producir daño físico.

Además de los posibles efectos de la exposición al calor que se relatan a continuación, se debe tener en cuenta el incremento del nivel de estrés térmico como un factor que, junto con otros puede dar lugar:

- Aumento la probabilidad de que se produzcan accidentes de trabajo
- Que se agraven dolencias previas (enfermedades cardiovasculares, respiratorias, renales, cutáneas, diabetes, etc.)

Si el estrés térmico es importante o, no siéndolo tanto, los trabajadores continúan trabajando durante mucho tiempo seguido sin hacer descansos, llega un momento en que tienen tanto calor que no pueden trabajar bien. Están muy incómodos, con apatía, con la capacidad de percepción y de atención y la memoria disminuidas, etc. En este estado, la probabilidad de que ocurran accidentes de trabajo aumenta mucho.

Además, en los trabajadores que tengan alguna enfermedad crónica, puede producirse un agravamiento de la misma. Si continúan esas condiciones de calor y los trabajadores siguen trabajando y acumulando calor, llegara un momento en que producirán diversos daños, incluidos en las llamadas enfermedades relacionadas con el calor, cuya gravedad es proporcional a la cantidad de calor acumulado. De ellas la más grave es el golpe de calor, que en muchas ocasiones provoca la muerte. Por otra parte, aunque cese el trabajo en condiciones de estrés térmico elevado y no se produzca una acumulación excesiva de calor en el cuerpo, los trabajadores también sufrirán daños si no reponen el agua y los electrolitos (sales) perdidos al sudar.

Síncope por calor

La pérdida de conciencia o desmayo son signos de alarma de sobrecarga térmica. La permanencia de pie o inmóvil durante mucho tiempo en un ambiente caluroso con cambio rápido de postura puede producir una bajada de tensión con disminución de caudal sanguíneo que llega al cerebro. Normalmente se produce en trabajadores no aclimatados al principio de la exposición al calor.

Deshidratación y pérdida de electrolitos

La exposición prolongada al calor implica una pérdida de agua y electrolitos a través de la sudoración. Aparecen espasmos dolorosos en las extremidades y en los músculos abdominales sometidos a un trabajo intenso y a la fatiga, aunque la temperatura corporal apenas aumenta. Esos calambres están causados por la depleción salina que se produce cuando la pérdida hídrica resultante de una sudoración profusa y prolongada se repone con agua no suplementada con sal y cuando los niveles circulantes de sodio descienden por debajo de un nivel crítico. La sed no es un buen indicador de la deshidratación ya que este reflejo aparece cuando ya se ha perdido hasta un 3% del líquido corporal, además la sensación de sed no es lo suficientemente intensa para compensar la pérdida hídrica que se produce al mismo tiempo. El tratamiento de los calambres por calor consiste en interrumpir la actividad, descansar en un

lugar fresco y reponer los líquidos y electrolitos perdidos. La exposición al calor debe evitarse durante al menos 24 o 48 horas.

Agotamiento por calor

Se produce principalmente cuando existe una gran deshidratación. Una deshidratación severa puede producir agotamiento por calor y colapso circulatorio; en estas circunstancias, la persona es incapaz de mantener la presión arterial y la consecuencia es que pierde el conocimiento. Los síntomas del agotamiento por calor son cansancio generalizado, habitualmente con cefalea, atontamiento y náuseas. La principal causa del agotamiento por calor es el estrés circulatorio provocado por la pérdida hídrica del sistema vascular. La reducción del volumen sanguíneo activa una serie de reflejos que reducen la circulación a los intestinos y la piel. La disminución del flujo sanguíneo periférico agrava la situación, puesto que se reduce la pérdida de calor en la superficie y aumenta todavía más la temperatura interna. El individuo puede desvanecerse por una caída de la presión arterial y la consiguiente disminución del riego cerebral. Cuando la persona se tumba, aumenta el aporte sanguíneo al corazón y al cerebro y, una vez que se enfría y bebe algo de agua, se recupera de forma casi inmediata. Los síntomas incluyen la pérdida de capacidad de trabajo, disminución de las habilidades psicomotoras, náuseas, fatiga, etc. Si no es una situación muy grave, con la rehidratación y el reposo se produce la recuperación del individuo.

Golpe de calor

Se desarrolla cuando la termorregulación ha sido superada, y el cuerpo ha utilizado la mayoría de sus defensas para combatir la hipertermia (aumento de la temperatura interna por encima de la habitual). Se caracteriza por un incremento elevado de la temperatura interna por encima de 40,5 °C, y la piel caliente y seca debido a que no se produce sudoración. El golpe de calor es una urgencia médica grave que puede provocar la muerte y que se presenta suele aparecer de manera brusca y sin síntomas precursores, aunque algunos pacientes con riesgo inminente de golpe de calor pueden presentar síntomas de alteraciones del sistema nervioso central, como cefalea, náuseas, atontamiento, debilidad, somnolencia, confusión, ansiedad, desorientación. Es un cuadro clínico complejo caracterizado por una hipertemia incontrolada que causa lesiones en los tejidos. Semejante elevación de la temperatura corporal se produce inicialmente por una intensa congestión por calor debida a una carga térmica excesiva. La hipertermia resultante provoca una disfunción del sistema nervioso central y, entre otras cosas, un fallo en el mecanismo normal de regulación térmica, acelerando así el aumento de la temperatura corporal.

El golpe de calor se define por tres criterios:

1. hipertermia severa con una temperatura interna (corporal profunda) normalmente superior a 42 °C
2. alteraciones del sistema nervioso central: estado de inconsciencia, temblores, pupilas dilatadas.
3. piel caliente y seca con cese de la sudoración.

Como medidas preventivas del golpe de calor se debería, antes de realizar una actividad física intensa y/o a exponerse a altas temperaturas, se recomienda pasar por un período de aclimatación. Cuando se realiza un esfuerzo físico, es esencial tener libre acceso a agua. Puesto que con el sudor se pierden electrolitos y la posibilidad de ingesta voluntaria de agua

puede estar limitada, retrasando así la reposición de líquidos para evitar la deshidratación térmica, tras una intensa sudoración deben también reponerse los electrolitos. La utilización de una ropa adecuada es otra medida importante. Las prendas fabricadas con tejidos que absorben el agua y son permeables al aire y al vapor de agua facilitan la disipación del calor.

Los trabajadores, deben ser informados de la carga de trabajo y el nivel de estrés por calor que tendrán que soportar, así como los riesgos de un golpe de calor y los síntomas previos. Por otro lado, cuando la exposición al calor es inevitable, mejorar estado físico de los trabajadores contribuye a mejorar su resistencia al trabajo en calor. La capacidad aeróbica máxima (VO_{2max}) es probablemente el principal determinante de la capacidad de una persona para realizar un trabajo físico prolongado en condiciones de calor. Las diferencias observadas en un principio entre distintos grupos en cuanto a la tolerancia al calor y que se atribuyeron al sexo, la raza o la edad, se achacan ahora a diferencias en la capacidad aeróbica y la aclimatación al calor (Nunneley, 1998).

7. Medidas preventivas

En el caso de que no se superen los límites establecidos por el Método del Índice de Sobrecarga Térmica (pero si se vulneran para el índice WBGT) o cuando se trabaje con ropa que limite de alguna forma la pérdida de calor, se deben realizar controles generales que pueden incluir las siguientes acciones:

- Ofrecer información y formación a los trabajadores sobre el estrés térmico y la sobrecarga térmica, así como instrucciones y procedimientos de trabajo precisos y programas de entrenamiento frecuentes.
- Fomentar en los trabajadores expuestos la ingesta de pequeñas cantidades de agua fresca ($\approx 15\text{ }^{\circ}\text{C}$) o bebida isotónica (aproximadamente un vaso) cada 20 minutos.
- Permitir la autolimitación de las exposiciones y fomentar la observación, con la participación de los trabajadores, con el fin de detectar los primeros síntomas de sobrecarga térmica en los demás.
- Controlar especialmente y en su caso limitar la exposición de aquellos trabajadores que tomen medicación que pueda afectar al funcionamiento del sistema cardiovascular, a la presión sanguínea, a la regulación térmica, a la función renal o a la sudoración; así como la ingesta de alcohol.
- Fomentar el mantenimiento físico de los trabajadores, peso corporal controlado, alimentación etc. Controlar especialmente a aquellos trabajadores que han permanecido durante un largo periodo sin exposición al calor y que han modificado sus parámetros de aclimatación.
- Considerar dentro de la vigilancia de la salud, la realización de pruebas médicas específicas con el fin de detectar precozmente la sensibilidad por exposición al calor.

Para proporcionar la protección adecuada frente al estrés térmico, además de la implantación de los controles generales, frecuentemente se requieren controles de trabajo específicos. Este tipo de controles son los procedimientos típicos de gestión del riesgo en Higiene industrial, es decir aplicar medidas en primer lugar sobre el foco emisor evitando su emisión o encerrándolo. En segundo lugar sobre el medio limitando la dispersión del contaminante colocando barreras.

Como último recurso sobre el trabajador protegiéndolo del efecto del contaminante, en este caso del calor, mediante el uso del Equipo de Protección Individual (EPI). Así las medidas comunes para la gestión del estrés térmico englobarían:

- Incrementar la circulación general de aire, reducir los procesos que liberan calor y vapor de agua y apantallar las fuentes de calor radiante.
- La ventilación natural (corrientes naturales de aire) es un medio lento pero eficaz para incrementar la transferencia de calor desde la piel al exterior. El aumento de la velocidad del aire incrementa la pérdida de calor, aunque se trate de aire del local, al facilitar la evaporación del sudor.
- El calor radiante se puede reducir mediante la interposición de barreras materiales que reduzcan la radiación térmica. Si no es posible aislar las fuentes de calor mediante pantallas y la radiación térmica es muy intensa se utilizará ropa que proteja la piel. Por el contrario al cubrir la piel también se reduce la refrigeración de la piel por convección o evaporación del sudor. La mayor dificultad se suele dar si la temperatura del aire es superior a la temperatura de la piel (35-36°C). En esa situación el cuerpo está ganando calor y la evaporación del agua en la superficie de la piel es la única vía de pérdida de calor. En estos casos juega un papel crucial la permeabilidad de los tejidos y la capacidad de circulación de aire a través de la ropa.

Cuando la aplicación de la metodología higiénica no es posible, como en el caso de la extinción de incendios forestales, las medidas administrativas cobran especial relevancia:

- Establecer tiempos de exposición aceptables para los trabajadores, tiempos de recuperación suficientes y limitación de la carga física (tasa metabólica). Estas medidas constituyen una vía de limitación de la exposición y de gestión del riesgo a través de la implantación de procedimientos de trabajo y gestión del personal.
- En última instancia, cuando los controles de ingeniería o administrativos son impracticables, la posibilidad de utilizar mecanismos de refrigeración personal, conjuntamente con ropa de protección, puede llegar a ser una alternativa. Existen chalecos refrigerados o trajes con mecanismos de refrigeración incorporados que impiden el incremento de la temperatura del cuerpo.

8. Bibliografía

- Apud E, Meyer F, Maureira F. Ergonomía en el combate de incendios forestales. Chile: Universidad de Concepción; 2002.
- Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR). Ergonomía del ambiente térmico. Determinación de la tasa metabólica. UNE-EN ISO 8996. Madrid; 2005.
- Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR). Ergonomía del ambiente térmico. Ergonomía del ambiente térmico. Estimación del aislamiento térmico y de la resistencia a la evaporación de un conjunto de ropa. UNE-EN ISO9920. Madrid; 2009.
- Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR). Ergonomía del ambiente térmico. Determinación de la tasa metabólica. UNE-EN ISO 8996; 2005.
- Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR). Ropas de protección. Requisitos generales. UNE-EN 340. Madrid: AENOR; 2004.
- Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR). Ropas de protección para trabajadores expuestos al calor. UNE-EN 531/A1. Madrid: AENOR; 1998.
- Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR). Ropas de protección. Protección contra el calor y el fuego. Determinación de la transmisión del calor durante la exposición de una llama. UNE-EN 367. Madrid; 1994.
- Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR). Ropa de protección para bomberos. Métodos de ensayo de laboratorio y requisitos de prestaciones para ropa forestal. UNE-EN 15614. Madrid; 2007
- Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR). Ergonomía de los ambientes térmicos. Instrumentos de medida de las magnitudes físicas. UNE-EN ISO 7726. Madrid; 2002.
- Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR). Ergonomía del ambiente térmico. Determinación analítica e interpretación del estrés térmico mediante el cálculo de la sobrecarga térmica estimada. UNE-EN ISO 7933. Madrid; 2005.
- Astrand PO, Rodahl K. Fisiología del trabajo físico. Buenos Aires: Panamericana; 2006.
- Baker SJ, Grice J, Roby L, Matthews C. Cardiorespiratory and thermoregulatory response of working in fire-fighter protective clothing in a temperate environment. *Ergonomics*. 2000; 42: 1350-1358.
- Bedford T. Environmental warmth and its measurement. *Medical Research Memorandum No. 17* . Londres: Her Majesty's Stationery Office. 1940.
- Belding HS, Hatch TV. Index for evaluating heat stress in terms of the resulting physiological strains. *Heat Piping Air Cond*. 1955; 27: 129-36.
- Boothby WM , Berkson J , Dunn HL . Studies of the energy of metabolism of normal individuals: a standard for basal metabolism, with a nomogram for clinical application. *Am J Physiol* . 1936; 116: 468-484.
- Budd GM, Brotherhood JR, Hendrie AL, Jeffery SE, Beasley FA, Costin BP, et al. Project Aquarius 13. The thermal burden of high insulation and encapsulation in wildland firefighters' clothing. *Int J Wildland Fire*. 1997d; 7: 207-218.
- Cheung SS, McLellan TM, Tenaglia S. The thermophysiology of uncompensable heat stress. Physiological manipulations and individual characteristics. *Sports Med*. 2000; 29: 329-359.
- De Bos J, Mol E, Visser B, Frings-Dresen M. The physical demands upon (Dutch) fire-fighters in relation to the maximum acceptable energetic workload. *Ergonomics*. 2004; 47: 446-460.
- DuBois D, DuBois EF. A formula to estimate the approximate surface area if height and weight be known. *Arch Intern Medicine*. 1916; 17: 863-7.
- Eglin, CM. Physiological responses to fire-fighting: thermal and metabolic considerations. *J Hum Environ Syst*. 2007; 10: 7-18.
- Fan J, Chen YS. Measurement of clothing thermal insulation and moisture vapour resistance using a novel perspiring fabric thermal manikin. *Meas Sci Technol*. 2002; 13: 1115-23.

- Gao C, Holmér I, Fan J et al. The comparison of thermal properties of protective clothing using dry and sweating manikins. In Koradecka D, editor. Proceedings of the Third European Conference on protective Clothing (ECPC) and NOKOBETEF 8. Warsaw, Poland: Central Institute for Labour Protection. 2006. pp. 1–6.
- Givoni B, Goldman RF. Predicting heart rate response to work, environment. and clothing. *J Appl Physiol.* 1973; 34(2):201–204.
- Yaglou, CP, D Minard. Control of heat casualties at military training centers. *Am Med Assoc Arch Ind Health.* 1957; 16:302–316 y 405.
- González-Alonso J, Teller C, Andersen SL, Jensen FB, Hyldeg T, Nielsen B. Influence of body temperature on the development of fatigue during prolonged exercise in the heat. *J Appl Physiol.* 1999; 86: 1032-1039.
- Havenith G, den Hartog E, Martini S. Heat stress in chemical protective clothing: porosity and vapour resistance. *Ergonomics.* 2011 May;54(5):497-507.
- Havenith G, Holmér I, Den Hartog EA, Parsons KC. Clothing evaporative heat resistance. Proposal for improved representation in standards and models. *Ann Occup Hyg.* 1999; 43: 335-346
- Holmer I. Protective clothing in hot environments. *Ind Health.* 2006; 44: 404-413.
- Houghton FC, Yagoglou CP. Determining equal comfort lines. *J ASHVE.* 1923; 29: 165–176.
- Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo. Nota Técnica de Prevención 323. Determinación del metabolismo energético. Luna Mendaza P. 1993. Disponible en: <http://www.insht.es/portal/site/Insht/menuitem.a82abc159115c8090128ca10060961ca/?vgnnextoid=db2c46a815c83110VgnVCM100000dc0ca8c0RCRD&x=0&text=323&y=0>.
- Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo. Nota Técnica de Prevención 922. Estrés térmico y sobrecarga térmica: evaluación de los riesgos (I). Monroy Martí E, Luna Mendaza P. 2011. Disponible en: <http://www.insht.es/portal/site/Insht/menuitem.a82abc159115c8090128ca10060961ca/?vgnnextoid=db2c46a815c83110VgnVCM100000dc0ca8c0RCRD&x=0&text=922&y=0>.
- Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo. Nota Técnica de Prevención 923. Estrés térmico y sobrecarga térmica: evaluación de los riesgos (II). Monroy Martí E, Luna Mendaza P. 2011. Disponible en: <http://www.insht.es/portal/site/Insht/menuitem.a82abc159115c8090128ca10060961ca/?vgnnextoid=db2c46a815c83110VgnVCM100000dc0ca8c0RCRD&x=0&text=923&y=0>.
- International Standardization Organization (ISO). Hot environments. Analytical determination and interpretation of thermal stress using calculation of required sweat rate. ISO 7933. Geneva; 1989.
- Laursen PB, Suriano R, Quod MJ, et al. Core temperature and hydration status during an Ironman triathlon. *Br J Sports Med.* 2006; 40:320–325.
- Lawson LK, Crown EM, Ackerman MY, Dale JD. Moisture effects in heat transfer through clothing systems for wildland firefighters. *Int J Occup Saf Ergon.* 2004; 10: 227-238.
- Ley 31/1995 de 8 de noviembre, de Prevención de Riesgos Laborales. Boletín Oficial del Estado nº 269 (10-11-1995).
- Lotens WA. Intercambio de calor a través de la ropa. . En: Jean-Jacques Vogt, Director de Capítulo. Enciclopedia de Salud y Seguridad en el Trabajo. 4ª Ed. Vol 2. Ginebra: Organización Internacional del Trabajo; 1998. 42.26- 42.32.
- McArdle, B, W Dunham, HE Halling, WSS Ladell, JW Scalt, ML Thomson, JS Weiner. The prediction of the physiological effects of warm and hot environments. *Medical Research Council Rep.* 47/ 391. Londres: RNP. 1947.
- Macpherson, RK. Physiological responses to hot environments. *Medical Research Council Special Report Series No. 298.* Londres: HMSO. 1960.
- Malchaire J, Piette A, Kampmann B, et al. Development and validation of the predicted heat strain model. *Ann Occup Hyg.* 2001; 45(2):123-35.
- McCullough, EA, BW Jones, PEJ Huck. A comprehensive database for estimating clothing insulation. *ASHRAE Trans.* 1985; 91:29–47.

- McKenzie JE, Osgood DW. Validation of a new telemetric core temperature monitor. *J Therm Biol.* 2004; 29:605-611.
- McKenzie JE, Osgood DW. Validation of a new telemetric core temperature monitor. *J Therm Biol.* 2004; 29: 605-611.
- McLellan TM, Pope JI, Cain JB, Cheung S. Effects of metabolic rate and ambient vapour pressure on heat strain in protective clothing. *Euro J Appl Physiol.* 1996; 74: 518-527.
- Mondelo PR, Torada EG, Comas S, Castejón E, Bartolomé E. Ergonomia 2. Confort y estrés térmico. Temas de Ergonomía y Prevención. Barcelona: Edicions UPC; 2005.pp 67-74.
- Moran DS, Shitzer A, Pandolf KB. A physiological strain index to evaluate heat stress. *Am J Physiol Regul Integr Comp Physiol.* 1998; 275:R129-R134.
- Nielsen B. Efectos del estrés por calor y trabajo en ambientes calurosos. En: Jean-Jacques Vogt, Director de Capítulo. Enciclopedia de Salud y Seguridad en el Trabajo. 4ª Ed. Vol 2. Ginebra: Organización Internacional del Trabajo; 1998. 42.5- 42.8.
- Nielsen R, Olesen BW, Fanger PO. Effect of physical activity and air velocity on the thermal insulation of clothing. *Ergonomics.* 1985; 28:1617-1632.
- Nunneley SA. Heat stress in protective clothing. Interactions among physical and physiological factors. *Scand J Work Environ Health.* 1989; 15: 52-57.
- Nunneley SA. Prevención del estrés por calor. En: Jean-Jacques Vogt, Director de Capítulo. Enciclopedia de Salud y Seguridad en el Trabajo. 4ª Ed. Vol 2. Ginebra: Organización Internacional del Trabajo; 1998. 42.11- 42.15.
- Olesen, BW, E Sliwinska, TL Madsen, P-O Fanger. Effect of body posture and activity on the thermal insulation of clothing: Measurements by a movable thermal manikin. *ASHRAE Trans.* 1982; 88:791-805.
- Organización Mundial de la Salud (OMS). Health factors involved in working under conditions of heat stress. *Technical Report 412.* Ginebra: OMS; 1969.
- Parsons KC. Evaluación del estrés por calor e índices de estrés por calor. En: Jean-Jacques Vogt, Director de Capítulo. Enciclopedia de Salud y Seguridad en el Trabajo. 4ª Ed. Vol 2. Ginebra: Organización Internacional del Trabajo; 1998. 42.17- 42.26.
- Real Decreto 1407/92, de 20 de noviembre, por el que se regulan las condiciones para la comercialización y libre circulación intracomunitaria de los equipos de protección individual. BOE nº 311 (28-12-92). Corrección de erratas BOE (24-2-93).
- Real Decreto 159/1995, de 3 de febrero, por el que se modifica el Real Decreto 1407/1992, de 20 de noviembre, por el que se regulan las condiciones para la comercialización y libre circulación intracomunitaria de los equipos de protección individual. BOE nº 57 (8-2-1995).
- Real Decreto 773/1997, 30 de mayo, sobre disposiciones mínimas de seguridad y salud relativas a la utilización por los trabajadores de equipos de protección individual. BOE nº 140 (12-06-1997).
- Rossi R. Fire fighting and its influence on the body. *Ergonomics.* 2003; 46: 1017-1033.
- Smith DL, Manning TS, Petruzzello SJ. Effect of strenuous live-fire drills on cardiovascular and psychological responses of recruit firefighters. *Ergonomics.* 2001; 44: 244-254.
- Smith DL, Petruzzello SJ, Kramer JM, Misner JE. The effects of different thermal environments on the physiological and psychological responses of firefighters to a training drill. *Ergonomics.* 1997; 40: 500-510.
- Smith, DL, Petruzzello, SJ. Selected physiological and psychological responses to live-fire drills in different configurations of firefighting gear. *Ergonomics.* 1998; 41: 1141-1154.
- Vogt JJ, Candas V, Libert JP, Daull F. Required sweat rate as an index of thermal strain in industry. En *Bioengineering, Thermal Physiology and Comfort*, dirigido por Cena K y Clark JA. Amsterdam: Elsevier.; 198. Pp 199-110.

Wang F, Gao C, Kuklane K , Holmér I. Determination of clothing evaporative resistance on a sweating thermal manikin in an isothermal condition: heat loss method or mass loss method? *Ann Occup Hyg.* 2011; 55 (7): 775-783.