

Trabajo Fin de Máster
Máster Universitario en Ingeniería Industrial

Confort térmico en espacios abiertos:
modelado y leyes

Autor: Paula Zbikowski Silveira

Tutora: María del Carmen Guerrero Delgado

Co-tutora: Teresa Rocío Palomo Amores

Departamento de Ingeniería Energética
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2021



Trabajo Fin de Máster
Máster Universitario en Ingeniería Industrial

Confort térmico en espacios abiertos: modelado y leyes

Autor:

Paula Zbikowski Silveira

Tutoras:

María del Carmen Guerrero Delgado

Teresa Rocío Palomo Amores

Departamento de Ingeniería Energética

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2022

*A mi madre y a mi hermano,
por ser mi norte día a día.*

*A mi padre, por ser mi estrella
polar.*

*A mis amigos, por el apoyo
incondicional.*

Agradecimientos

Me gustaría agradecer la labor de D. Servando Álvarez Domínguez, Catedrático del Departamento de Ingeniería Energética de la Universidad de Sevilla, a D. José Sánchez Ramos, profesor Doctor del Área de Máquinas y Motores Térmicos de la Universidad de Sevilla, y a mis tutoras María del Carmen Guerrero Delgado y Teresa Palomo Andrés, por su docencia, por su apoyo y seguimiento ejemplar del presente trabajo, y por darme la oportunidad y ayuda necesaria para poder llevarlo a cabo.

A mi familia y amigos, por acompañarme en esta última etapa.

Paula Zbikowski Silveira

Sevilla, 2022

Resumen

El confort término en espacios exteriores actualmente sugiere alguna problemática en cuanto a la incapacidad de alcanzar un medio ambiente urbano de calidad. Los espacios públicos pueden ver limitados sus periodos y horarios de uso para las personas al no tener unas condiciones adecuadas de habitabilidad. De ahí la importancia de conseguir una forma de evaluar la sensación térmica que percibe un individuo en cualquier lugar exterior, conocer de qué forma estaría en confort, y así poder usarlo de herramienta para tomar decisiones previas en el diseño urbano.

En el presente Trabajo de Fin de Máster, dentro de un marco de análisis, se recoge el estudio de una situación previa de desconfort, el cálculo y propuesta de unas mejoras de dichas condiciones de un espacio urbano de juegos ya existente, situado en la Plaza Manuel Garrido en la ciudad de Sevilla.

El proyecto se estructura en tres partes diferenciadas; una introducción y exposición del modelo de confort humano empleado, que será empleado para evaluar el grado satisfacción del individuo con las condiciones exteriores, una parte dedicada al desglose de las distintas técnicas de acondicionamiento empleadas para mejorar la permanencia en el lugar objetivo, y un último punto donde se recopilan los resultados visibles de dichas medidas de mejora propuesta.

Para su realización se ha empleado el software EES (Engineering Equation Solver), en el que se ha incluido el código de ecuaciones, distintos análisis de sensibilidad para analizar la exactitud del modelo, y el diseño de una interfaz que permite introducir los parámetros de entrada y visualizar los resultados de manera directa.

Abstract

Currently, outdoor thermal comfort suggests some problems regarding the inability to achieve a quality urban environment. Public spaces can see their periods and schedules of use limited for people, by not having adequate habitability conditions. Hence the importance of obtaining a way to evaluate thermal sensation that a human perceives in any outdoor place, knowing how it would be comfortable, and thus being able to use a tool to make prior decisions in urban design.

In this thesis, with an analysis framework, the study case collected a previous discomfort situation, the calculation and proposal of improvements of these conditions of an existing urban playground, located in Manuel Garrido square, in the city of Seville.

The project is structured in three different parts; an introduction and exposition of the human comfort model used, which will be used to evaluate the individual satisfaction degree with the external conditions; a part dedicated to the explanations of different conditioning techniques used to improve permanence in the objective place; and a last point where the visual results of those proposed measures are compiled.

To its completion, the EES (Engineering Equation Solver) software has been used, in which the equations code has been included, different sensitivity analysis to analyze the accuracy of the model, and the design of an interface that allows entering the input parameters, and view the results directly.

Índice

Agradecimientos	7
Resumen	9
Abstract	11
Índice	13
Índice de Tablas	15
Índice de Figuras	16
Índice de Gráficos	17
Notación	19
1 Introducción	23
1.1 Estado del arte	23
1.2 Objetivo	25
2 Metodología	26
3 Datos de partida e hipótesis	29
3.1 Datos de partida	29
3.2 Hipótesis	29
3.2.1 Hipótesis iniciales	29
3.2.2 Hipótesis adicionales	29
4 Modelo de confort	30
4.1 Algoritmo	31
4.1.1 Metabolismo y balance térmico	31
4.1.2 Pérdidas de calor sensible	34
4.1.3 Pérdidas de calor respiratoria	45
4.1.4 Sudoración y evaporación cutánea	46
4.2 Índices de confort	49
4.2.1 Carga térmica (Q)	50
4.2.2 Índice de estrés térmico (ITS)	55
4.2.3 PET (Physiological Equivalent Temperature)	58
5 Estrategias de acondicionamiento	62
5.1 Cobertura	62

5.2	Enfriamiento de las superficies	64
5.3	Enfriamiento del aire	65
5.4	Estrategias de acondicionamiento seleccionadas	66
6	Modelización del acondicionamiento	67
6.1	Enfriamiento del aire	67
6.1.1	Balance en el aire	68
6.1.2	Interfaz tratamiento de aire	69
6.1.3	Análisis de resultados	70
6.2	Cobertura	70
6.2.1	Interfaz modelo de cobertura	79
6.2.2	Análisis de resultados de las temperaturas radiantes (ejemplo)	80
6.3	Interfaz final	82
7	Análisis de resultados situación mejorada	83
7.1	Sweating rate	83
7.2	PET	84
8	Conclusiones	85
9	Anexo i. Tablas de resultados	86
9.1	Resultados de los índices de confort en situación caso base: sin ningún acondicionamiento	86
10	Referencias bibliográficas	88

Índice de Tablas

Tabla 1. Calor generado en cada actividad física [1]	32
Tabla 2. Otras ecuaciones para coeficiente de transferencia por convección [1]	34
Tabla 3. Valores de la eficiencia de calentamiento (U)	38
Tabla 4. Aislamiento térmico para diferentes niveles de vestimenta (clo) [1]	41
Tabla 5. Eficiencia de impregnación de vapor para diferentes niveles de vestimenta [1]	47
Tabla 6. Escala de sensación térmica general [5]	50
Tabla 7. Escala de valoración de la carga térmica [5]	51
Tabla 8. Escala de valoración del índice de estrés térmico [5]	56
Tabla 9. Escala de valoración del PET [5]	59
Tabla 10. PET frente a la temperatura exterior para diferentes met y clo	60
Tabla 11. Temperaturas media horaria en verano (Sevilla)	61
Tabla 12. Análisis de resultados del tratamiento de aire	70
Tabla 13. Factores de área proyectada	72
Tabla 14. Factores de área proyectada simplificada	72
Tabla 15. Análisis de resultados de los factores de forma	80
Tabla 16. Análisis de la influencia de la altura de la cobertura	81
Tabla 17. Análisis de la influencia del tamaño de la cobertura	81
Tabla 18. Análisis de los resultados del sweating rate en el caso modificado (sin tratamiento de aire)	83
Tabla 21. Análisis de los resultados del PET en el caso modificado (con tratamiento de aire)	84

Índice de Figuras

Figura 1. Focos de calor y focos de frío en entorno urbano y rural	24
Figura 2. Ubicación del espacio objetivo de estudio	25
Figura 3. Metodología seguida en el desarrollo	28
Figura 4. Interacción humana con el entorno. (2017 ASHRAE Handbook – Fundamentals (SI)) [1]	31
Figura 5. Representación flujos de intercambio de calor	33
Figura 6. Cálculo de la sombra proyectada por una persona (2D)	36
Figura 7. Representación de la cámara de aire	37
Figura 8. Esquema diferencia entre temperatura de la piel, temperatura de la ropa y temperatura operativa	40
Figura 9. Pérdidas de calor respiratorias	46
Figura 10. Techos verdes (coberturas vegetales)	63
Figura 11. Cobertura formada por lamas	63
Figura 12. Ejemplo de pavimentos fríos	64
Figura 13. Unidad de Tratamiento de Aire	65
Figura 14. Ejemplo enfriamiento latente: micronizadores	66
Figura 15. Sistema de acondicionamiento: enfriamiento del aire	67
Figura 16. Interfaz tratamiento de aire	69
Figura 17. Visualización inicial de la cobertura	74
Figura 18. Visualización de superficies para el cálculo de T_{up}	76
Figura 19. Visualización de superficies para el cálculo de T_{down}	77
Figura 20. Visualización de superficies para el cálculo de T_{right}	78
Figura 21. Interfaz modelado de la cobertura	79
Figura 22. Modelo de resultados para evaluar el efecto de la cobertura	80
Figura 23. Interfaz final del modelo	82

Índice de Gráficos

Figura 1. Focos de calor y focos de frío en entorno urbano y rural	24
Figura 2. Ubicación del espacio objetivo de estudio	25
Figura 3. Metodología seguida en el desarrollo	28
Figura 4. Interacción humana con el entorno. (2017 ASHRAE Handbook – Fundamentals (SI)) [1]	31
Figura 5. Representación flujos de intercambio de calor	33
Figura 6. Cálculo de la sombra proyectada por una persona (2D)	36
Figura 7. Representación de la cámara de aire	37
Figura 8. Esquema diferencia entre temperatura de la piel, temperatura de la ropa y temperatura operativa	40
Figura 9. Pérdidas de calor respiratorias	46
Figura 10. Techos verdes (coberturas vegetales)	63
Figura 11. Cobertura formada por lamas	63
Figura 12. Ejemplo de pavimentos fríos	64
Figura 13. Unidad de Tratamiento de Aire	65
Figura 14. Ejemplo enfriamiento latente: micronizadores	66
Figura 15. Sistema de acondicionamiento: enfriamiento del aire	67
Figura 16. Interfaz tratamiento de aire	69
Figura 17. Visualización inicial de la cobertura	74
Figura 18. Visualización de superficies para el cálculo de T_{up}	76
Figura 19. Visualización de superficies para el cálculo de T_{down}	77
Figura 20. Visualización de superficies para el cálculo de T_{right}	78
Figura 21. Interfaz modelado de la cobertura	79
Figura 22. Modelo de resultados para evaluar el efecto de la cobertura	80
Figura 23. Interfaz final del modelo	82

Notación

T_{ext}	Temperatura del ambiente exterior (°C)
P_{ext}	Presión del ambiente exterior (kPa)
V	Velocidad del viento (m/s)
met	Tasa metabólica según el nivel de actividad de una persona (met)
I_{clo}	Nivel de vestimenta de una persona (clo)
P_{sk}	Presión de saturación del aire a la temperatura de la piel (kPa)
T_{sk}	Temperatura de la piel (°C)
T_{cl}	Temperatura de la ropa (°C)
f_{cl}	Relación entre el área de ropa que cubre el cuerpo y el área de piel total
i_{cl}	Eficiencia de impregnación de vapor (adimensional)
\square	Emisividad de la piel (adimensional)
T_{re}	Temperatura rectal. Calibración de la temperatura corporal más exacta (°C)
RD	Radiación solar directa incidente (W/m^2)
Rd	Radiación solar difusa incidente (W/m^2)
Rr	Radiación solar reflejada (W/m^2)
R_c	Radiación solar absorbida de la que incide sobre la superficie del cuerpo
R_L	Intercambio radiante larga longitud de onda con las superficies que rodean
C	Intercambio por convección entre la superficie del cuerpo y el aire ambiente
SHL	Pérdidas de calor sensibles (Sensible Heat Losses)
q_{res}	Pérdidas de calor respiratorias
C_{res}	Pérdidas de calor sensibles respiratorias
E_{res}	Perdidas de calor latentes respiratorias
E_{sk}	Pérdidas de calor por sudoración y difusión del vapor de agua por la piel
E_{rsw}	Evaporación a través de la piel por termorregulación (W/m^2)
m_{rsw}	Tasa de generación regulatoria (kg/m^2s)
h_{fg}	Calor de vaporización del agua (J/kg)
E_{dif}	Evaporación a través de la piel por difusión (W/m^2)
E_{max}	Tasa de evaporación máxima (W/m^2)
S_k	Tasa de almacenamiento de calor corporal en la piel
S_{cr}	Tasa de almacenamiento de calor corporal en el núcleo (core)
h_c	Coefficiente convectivo de transferencia (W/m^2K)
h_r	Coefficiente radiante de transferencia (W/m^2K)
h_{cr}	Coefficiente convectivo – radiante (W/m^2K)
R_{cl}	Resistencia térmica que ejerce la ropa (m^2K/W)

$R_{e,cl}$	Resistencia térmica que ejerce la ropa a la transferencia de calor por evaporación (m^2kPa/W)
M	Parte de la tasa metabólica que se convierte en calor = metabolismo (W/m^2)
W	Parte de la tasa metabólica aprovechada para realizar trabajo (W/m^2)
μ	Relación existente entre M y W (adimensional)
T_a	Temperatura seca del ambiente exterior una vez ha sido tratada ($^{\circ}C$)
P_a	Presión de vapor de agua del aire exterior una vez ha sido tratada (kPa)
T_o	Temperatura operativa ($^{\circ}C$)
T_{RM}	Temperatura radiante media ($^{\circ}C$)
w	Humedad de la piel
w_{dif}	Humedad de la piel en ausencia de sudoración
w_{rsw}	Tasa del área del cuerpo que se debería humedecer para evaporar el sudor regulador
σ	Constante universal de la naturaleza de la radiación (W/m^2K^4)
T_{rsolar}	Temperatura radiante por efecto de la radiación de onda corta ($^{\circ}C$)
T_{rlarga}	Temperatura radiante por efecto de la radiación de onda larga ($^{\circ}C$)
A_s	Área de la sombra que genera un obstáculo (m^2)
r	Radio del cilindro que constituye la persona de manera aproximada (m)
h	Altura de la persona (m)
β	Altura solar ($^{\circ}$)
$A_{Dubois} (A_D)$	Área aproximada de la superficie corporal por la expresión DuBois (m^2)
F_{EFF}	Factor área efectiva (% de área corporal sobre la que incide la radiación)
α	Albedo
D	Radiación difusa total (W/m^2)
S	Radiación directa total (W/m^2)
α_{GND}	Albedo del suelo (ground)
U	Eficiencia de calentamiento
LR	Relación de Lewis (K/kPa)
h_e	Coefficiente de transferencia por evaporación (W/m^2kPa)
I_a	Aislamiento de la capa de aire
T_{skeqnu}	Temperatura de la piel en equilibrio para un nivel bajo de vestimenta ($^{\circ}C$)
T_{skeqcl}	Temperatura de la piel en equilibrio para un nivel alto de vestimenta ($^{\circ}C$)
T_{sa}	Temperatura sol-aire = Temperatura operativa ($^{\circ}C$)
$T_{sk,req}$	Temperatura de la piel en condiciones de confort ($^{\circ}C$)
$E_{rsw,req}$	Evaporación a través de la piel por termorregulación en condiciones de confort (W/m^2)
Q	Carga térmica (W/m^2)
ITS	Índice de estrés térmico
E	Cantidad de calor segregado (W)
f	Eficiencia de enfriamiento de la sudoración (adimensional)
SR	Sweating rate (Tasa de sudoración) (g/h)
PET	Temperatura psicológica equivalente ($^{\circ}C$)
m_1	Caudal de aire en sin tratar (en condiciones exteriores) (kg/s)

C_p	Calor específico del aire (J/kgK)
T_1	Temperatura del aire sin tratar (en condiciones exteriores) (°C)
T_{ze}	Temperatura de la mezcla de corrientes (°C)
m_2	Caudal de aire que sufrirá un enfriamiento evaporativo (kg/s)
T_2	Temperatura del aire tras enfriamiento evaporativo (°C)
m_3	Caudal de aire que sufrirá un enfriamiento sensible y latente (kg/s)
T_3	Temperatura del aire tras enfriamiento sensible y latente (°C)
w_1	Humedad del aire sin tratar
w_2	Humedad del aire tras enfriamiento evaporativo
w_3	Humedad del aire tras enfriamiento sensible y latente
w_{ze}	Humedad de la mezcla de corrientes
ϵ_{ee}	Eficiencia del enfriamiento evaporativo
T^e	Temperatura de entrada (°C)
T^s	Temperatura de salida (°C)
T^{bh}	Temperatura de bulbo húmedo (°C)
ϵ_{UTA}	Eficiencia de la unidad de tratamiento de aire
Δ_{UTA}	Salto de temperatura en la unidad de tratamiento de aire
T^{BF}	Temperatura de salida de la batería de frío
FF_{cielo}	Factor de forma con el cielo
$FF_{cobertura}$	Factor de forma con la cobertura
FF_{otros}	Factor de forma con la superficie denominada “otros”
FF_{suelo}	Factor de forma con el suelo
T_{pr}	Temperatura radiante plana (°C)
H	Altura de la cobertura (m)

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Estado del arte

En general, siempre ha existido una constante preocupación por la mejora de las condiciones en las que habita el ser humano en su entorno, con el fin de ofrecer una armonía con el mismo y un bienestar psicológico y físico, de forma que no condicionen en gran medida la forma de vida de los habitantes.

A lo largo de la historia, el diseño de los espacios públicos, tales como parques, plazas o calles, ha supuesto siempre una situación con intereses contrapuestos, entre la persecución de la expansión de las áreas urbanas y con ello los avances tecnológicos, y el desarrollo de un entorno físico de fácil adaptación, de forma que los intercambios de calor entre el individuo y el entorno se produzcan en condiciones favorables sin causar agotamiento o abatimiento.

El clima de las zonas del sur de la península (Andalucía), se trata de un clima mediterráneo, caracterizado por tener veranos áridos o secos y muy calurosos, e inviernos con pocas precipitaciones y con temperaturas no demasiado bajas. Es por ello que el enfoque del diseño urbano se inclina por la mitigación y amortiguación de las altas temperaturas y la alta radiación de estos lugares durante los meses de verano. Para ello se utilizan recursos tales como toldos, pérgolas, superficies con vegetación, recursos hídricos como pueden ser fuentes o estanques, con la finalidad de que se suavicen las condiciones climatológicas ante las que se encuentran las personas y que se cree un microclima que mejore su habitabilidad.

Si bien es cierto que antiguamente, a la hora de diseñar un espacio exterior, se hacía centrándose en el confort urbano que iba a generar, sin embargo, era una tarea bastante compleja la de evaluar las condiciones a satisfacer y de cuantificar el efecto que produciría cada una de las técnicas de acondicionamiento y de valorar cuál de ellas es la más idónea para cada caso.

Todo ello se acentúa al evidenciarse en diversos estudios que la evaluación del confort en espacios exteriores se trata de una tarea complicada en comparación con los espacios interiores. Los espacios urbanos conllevan a una mayor dificultad al entrar en juego la variabilidad de las magnitudes con respecto al espacio y al tiempo de los factores climáticos (temperatura, viento, radiación...). Tanto la geometría urbana, es decir, los patrones y disposiciones de los elementos que componen el entorno urbano, como las propiedades, sobre todo térmicas, de cada uno de los materiales que lo componen, podrían influir en la generación de microclimas desfavorables.

El urbanismo bioclimático se encarga de planificar el desarrollo territorial de los espacios públicos y de sus edificios de manera que se cree un entorno cómodo para la vida comunitaria. Los principales agentes de actuación son: el sol y el viento. Ambos casos se tratan de agentes controvertidos. Con respecto a las corrientes de viento, la infraestructura urbana sirve como estrategia de ventilación natural, con el objetivo de que permitan renovar el aire contaminado por la propia naturaleza de las ciudades, mientras que esta misma edificación no debe tener una morfología que genere efectos de viento, como por ejemplo el efecto Venturi, induciendo a elevadas velocidades de la corriente que genere cierto disconfort. Con respecto al sol ocurre lo mismo. La radiación solar por un lado es vital para los ciudadanos, por motivos físicos y de confort lumínico, mientras que una exposición directa, unido a temperaturas elevadas, conlleva a unas condiciones ambientales desfavorables. De esta forma, las alturas de los edificios, sus posiciones relativas y distancias entre ellos influye en la cantidad de radiación incidente en las calles, o a partir de ahora denominado cañón urbano, y también a la velocidad del viento a la que circula el mismo.

Inciendo en lo comentado anteriormente, se debe remarcar la existencia de cierto calentamiento del aire con respecto al rural debido a tres conceptos claros: la captación solar de la ciudad, la falta de movimiento de aire en las ciudades y el calor antropogénico. A este fenómeno se le denomina “isla de calor urbana”, y que sucede especialmente durante la noche. Este aumento de las temperaturas tiene como origen diferentes focos de calor (*Figura 1*):

- Polígonos industriales, zonas comerciales, gases emitidos por los automóviles, contaminación lumínica... que desprenden calor debido a su funcionamiento ordinario.
- Existencia de diversos materiales de construcción de los edificios, tales como el cemento, o el asfalto para las carreteras o vías peatonales, que tienen una menor capacidad de liberación del calor que ha incidido de forma pasiva durante las horas más cálidas del día, al tener una baja conductividad. Es decir, todos los materiales no se comportan de la misma forma, por lo que la diferencia entre sus coeficientes de absorción, reflexión, su inercia térmica influyen en el aumento de temperatura.
- Contaminación atmosférica y efecto invernadero.

Todo ello afecta negativamente tanto a la adaptabilidad en entornos urbanos, como a la climatización de los edificios. Sin embargo, en interiores es más controlable, en tanto en cuanto se fijen unas condiciones determinadas a las que se quieren mantener el clima interior o impulsar el aire, de forma que el sistema de climatización trabaje más o menos en función de unas condiciones de consigna. Por el contrario, en entornos exteriores sería más complicado controlar todos los puntos de una misma estancia, puesto que la variabilidad de sus parámetros es mucho más amplia.

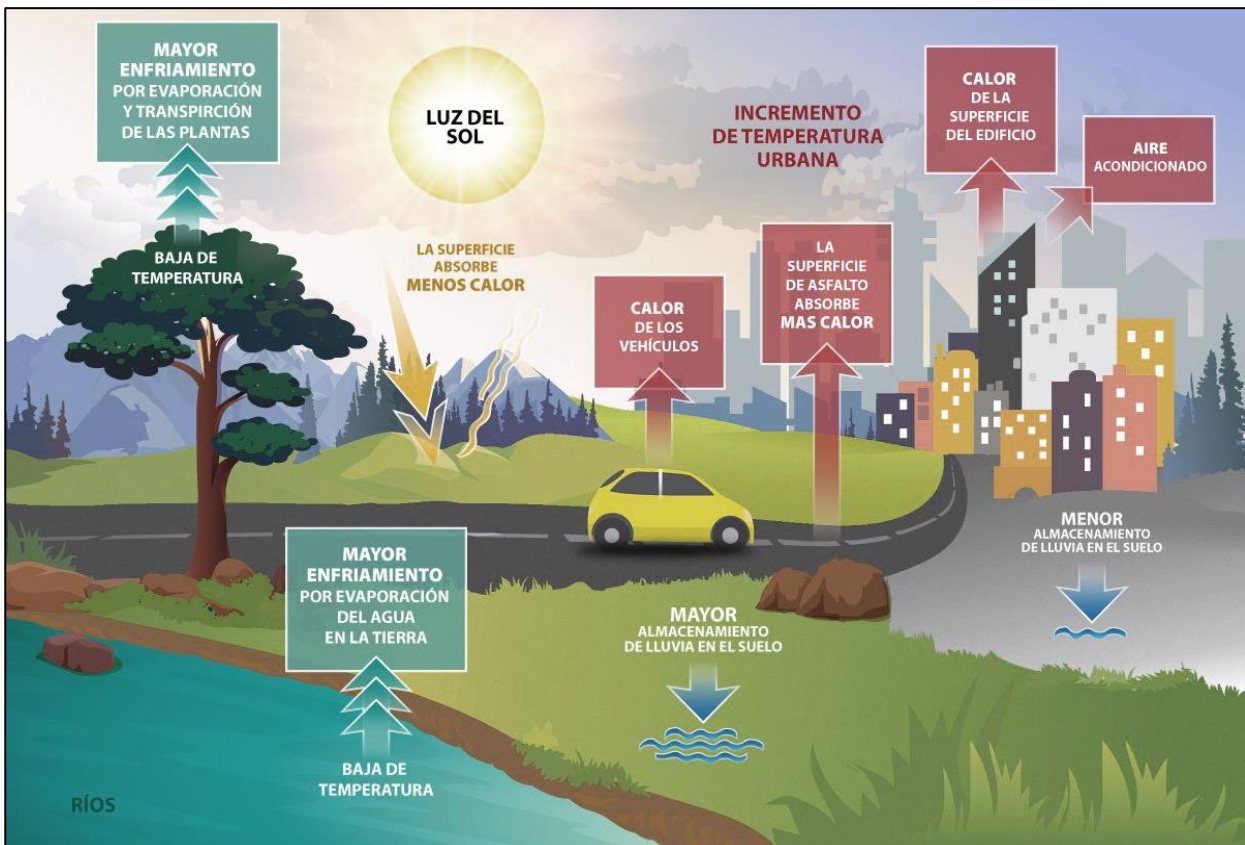


Figura 1. Focos de calor y focos de frío en entorno urbano y rural

Los estudios realizados previamente en el diseño de los espacios exteriores proporcionan a los planificadores urbanos y arquitectos información muy relevante para el desarrollo de los núcleos urbanos, para la creación de entornos más confortables. Será posteriormente cuando, en lugares en los

que no se han puesto de manifiesto estos criterios, y ante los que haya variado las condiciones de contorno de la problemática inicial, haya que actuar instaurando técnicas de acondicionamiento como las comentadas con anterioridad para la mejora de estas situaciones.

1.2 Objetivo

La iniciativa de este Trabajo Fin de Máster surge en relación a un proyecto, cofinanciado por la Unión Europea, en el que participan tanto el Ayuntamiento de Sevilla, como la Empresa Metropolitana de Agua y Saneamiento de Sevilla (Emasesa) y la Universidad de Sevilla, entre otros, en lucha contra los efectos adversos del cambio climático y denominado *Life Watercool*, con el objetivo de conseguir una mejor adaptación climática y de ahorro de agua en la ciudad. El proyecto se basa en la reurbanización de la Avenida de la Cruz Roja, beneficiando también a todo su entorno y calles colindantes. Adicionalmente, se tratarán las mejoras del parque Manuel Garrido (*Figura 2*).

Como ya se conoce, las temperaturas durante el verano en Sevilla son muy elevadas, entorno a los 36°C de media. Este trabajo se centrará en el análisis del espacio de la zona de juegos incluida en el proyecto, que en la actualidad no dispone de ningún mecanismo de mitigación de las condiciones climatológicas adversas, de forma que imposibilita la permanencia en el mismo durante un tiempo prolongado y reduciéndose la utilidad de este espacio.

En consecuencia, este trabajo tiene como objetivo el análisis climático de este espacio exterior real, y de la necesidad de disponer de un algoritmo de confort de calidad para poder tomar decisiones en fase de diseño de sistemas de acondicionamiento de espacios abiertos, o en su defecto, sirva de herramienta para evaluar el tratamiento de los mismos sistemas en función del uso del espacio. En cuanto al uso, se tendrán en cuenta que tanto la actividad que se realice como la duración de dicha actividad, influirán de forma directa en la evaluación.



Figura 2. Ubicación del espacio objetivo de estudio

2 METODOLOGÍA

La metodología seguida en el presente trabajo se ha basado en la consecución del procedimiento representado en la *Figura 3*. Es de vital importancia seguir unos pasos detallados y concretos, que permitan obtener unos datos adecuados para una correcta evaluación de los objetivos de este estudio, de manera ordenada, y basada en documentación contextualizada, contrastada y veraz.

Todo procedimiento tiene como punto de partida o como “Paso 0” la **identificación de un problema** a investigar, con cierto interés académico, que se caracterice por ser un tema interesante, relevante, sin resolver y que debe ser resuelto para atender a unas necesidades básicas, como es en este caso el bienestar térmico.

Como se ha comentado en el punto anterior, la problemática identificada es la existencia de un espacio urbano y público condenado a unas condiciones exteriores muy arduas sobre las que se pretende actuar, de manera que se modifiquen hasta el alcance de unos parámetros de confort viables. Los medios de actuación, al ser un espacio en el que el nivel de intensidad de la estancia es de larga duración, serán más completos que en zonas en las que la estancia es corta. Dichos medios serán la incorporación de elementos de control solar, equipamiento encargado del acondicionamiento del aire (enfriamiento/calentamiento de superficies) y de distribución del mismo, y medidas de confinamiento o “barreras” que reduzcan la entrada de aire no tratado y que disminuyan la eficiencia del sistema de climatización.

Una vez identificada la problemática, es primordial realizar una **revisión de la literatura** con el fin de tener un dominio considerable de la temática y tener unas bases para el estudio y tratamiento de la misma. En este caso, los principales documentos sobre los que se ha trabajado son los siguientes:

- **American Society of Heating, Refrigerating & Air-Conditioning (ASHRAE) 2017 Fundamentals (SI Edition)**. Se trata de un líder global en cuanto a información técnica sobre el arte de la calefacción, ventilación, aire acondicionado y eficiencia energética. De este documento específico se ha trabajado con el capítulo 9 “*Chapter 9: Thermal Comfort*”, del cual se ha obtenido toda la información necesaria para modelar los flujos de calor que se producen durante la interacción del cuerpo humano con el ambiente que le rodea.
- **Norma UNE-EN ISO 7933**. También se comentan los balances energéticos producidos en el individuo, al igual que en el documento anterior, pero también detalla puntos interesantes en cuanto al cálculo de temperaturas específicas, como es el caso de la temperatura media de la piel.
- Otros documentos, como es el caso de la bibliografía de *T.R. Oke*, que compone una investigación científica sobre los climas urbanos.
- **Guía básica para el acondicionamiento climático de espacios abiertos**, guía realizada por el Grupo de Termotecnia del departamento de Ingeniería Energética y Mecánica de Fluidos de la Universidad de Sevilla, con el que se pretende exponer técnicas de acondicionamiento urbano eficientes, los resultados de su actuación y datos basados en la experiencia previa.

- Determinados artículos de diversos expertos en temas relacionados con el confort exterior (o comúnmente llamado “*Outdoor Thermal Comfort - OTC*”, tales como *J. Pickup, Höppe, Pearlmutter...* que se comentarán con más detalle en el desarrollo del presente documento.

Una vez se ha adquirido cierta base de conocimientos con los que tratar, se plantea el **modelo de confort**. Estos modelos de confort suelen ser modelos matemáticos, es decir, más rigurosos desde el punto de vista científico, sin embargo, es cierto que en espacios urbanos pierden algo de rigurosidad al depender de muchos factores. El modelo de confort se define flujo a flujo, es decir, mediante el cálculo de un balance térmico, expresando de manera detallada cada una de las componentes (o flujos de calor). Para el desarrollo de este modelo de confort se han establecido ciertas hipótesis explicativas que se explicarán con posterioridad.

El paso 3 de la metodología seguida se corresponde con la realización de determinados **análisis de sensibilidad**. Se estudiará el efecto de ciertos parámetros, la influencia de las hipótesis iniciales establecidas o si, por el contrario, se identifican nuevas hipótesis a establecer, de manera que de existir, se volvería al paso anterior y conllevaría a la modificación del modelo de confort. También se analizará la exactitud o confiabilidad del modelo mediante los indicadores de confort que se definirán posteriormente.

Una vez dado finalizado el modelo de confort y todas sus iteraciones, se implementarán todas las **ecuaciones en el software EES**, con el fin de contar con una herramienta de cálculo fácil y sencilla y que permita obtener resultados susceptibles de análisis.

En dicha calculadora, se implementarán tanto las ecuaciones del balance energético en la situación base de la ubicación, como la codificación de los sistemas de tratamiento de aire que se implementan posteriormente, como por ejemplo, la introducción de una cobertura sobre el parque, donde será necesario conocer los factores de forma existentes entre las diferentes “superficies” (pavimento, cielo, cobertura...). Adicionalmente, también se incorporarán las ecuaciones correspondientes con el tratamiento de aire mediante unidades de tratamiento de aire (UTA), en los que se toma el aire no acondicionado del exterior y se trata hasta conseguir impulsarlo al recinto en condiciones deseables para las personas que se encuentren en el lugar.

Además del código implementado en el programa, se ha diseñado una interfaz desde la cual se pueden modificar directamente los datos de entrada y se recalculan las variables más interesantes, como pueden las temperaturas o los índices de confort. En adición, en la interfaz se representará un esquema simplificado de la situación para que se tenga un mejor concepto sobre lo que se está hablando.

Como quinto y último paso, se representarán unas tablas que serán empleadas para la **toma de decisiones rápidas**, como puede ser el caso de estudiar la influencia de las diferentes técnicas de acondicionamiento en los índices de confort y cuál combinación es la más adecuada para la consecución de según qué objetivos. Se implementarán numerosos ejemplos del uso de la calculadora.

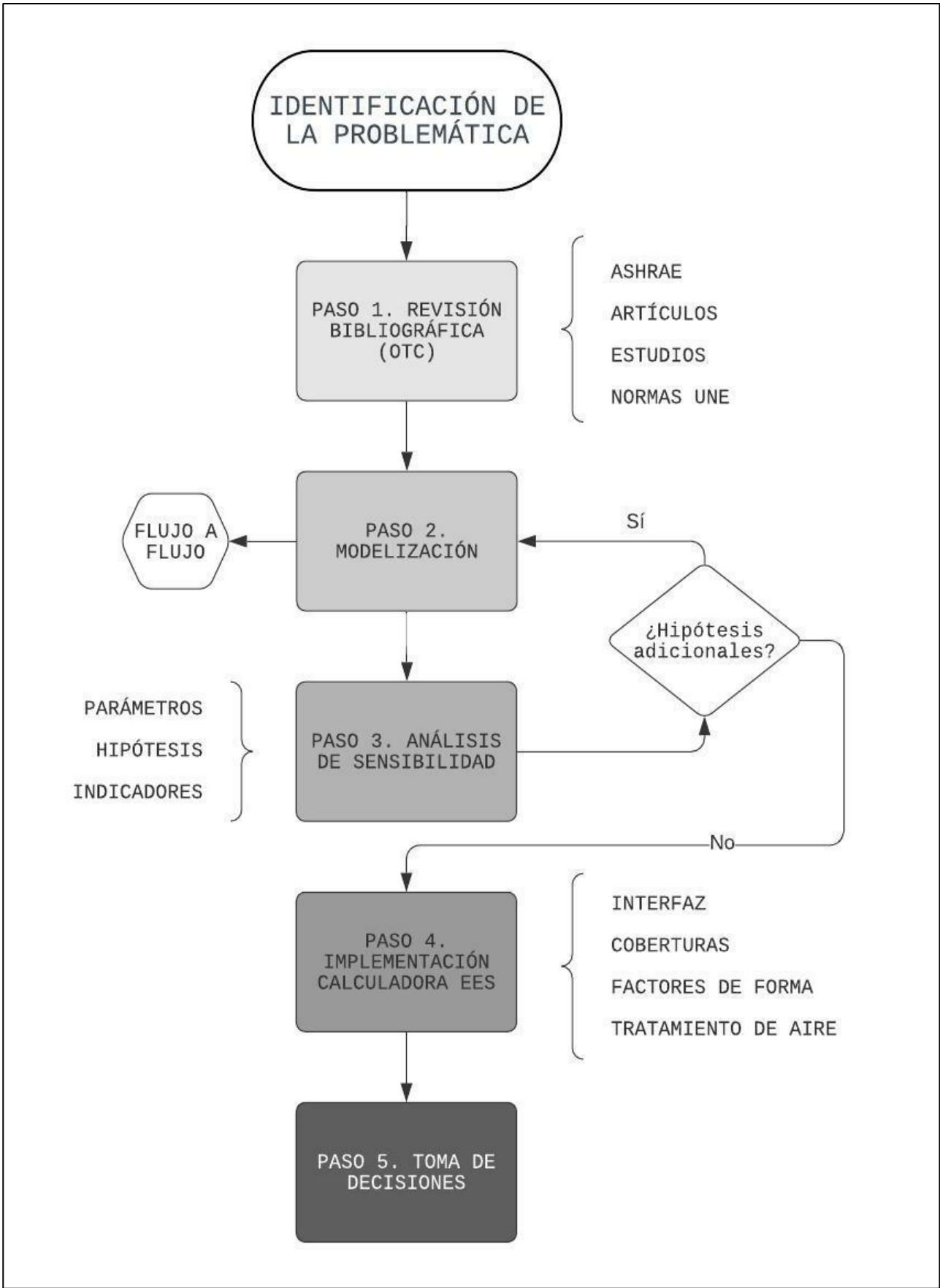


Figura 3. Metodología seguida en el desarrollo

3 DATOS DE PARTIDA E HIPÓTESIS

3.1 Datos de partida

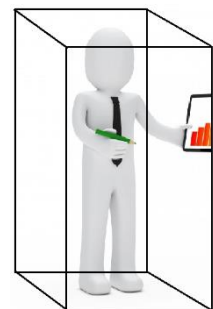
Como datos de entrada para la aplicación del modelo de confort se tienen las siguientes variables:

- Condiciones climatológicas exteriores, sin tratar. Es decir, temperatura y presión ambiente, que serán denominadas T_{ext} y P_{ext} .
- Temperaturas de los elementos que componen los alrededores, para evaluar la influencia de dichas superficies en las condiciones climatológicas anteriores. A modo de ejemplo, el calentamiento de las superficies como suelo o coberturas, aumentarían la temperatura del entorno. Estas temperaturas se corresponderán con las temperaturas de: suelo, cielo, cobertura y lo que comúnmente denominamos “otros” para hacer referencia a todo lo demás que rodea al lugar a excepción de los otros tres comentados.
- Velocidad del aire exterior (V). Es uno de los parámetros que se incluye en los cálculos de la sensación térmica. Se expresa en m/s y afectan al cálculo de las pérdidas de calor por convección.
- Tasa metabólica, más concretamente la evaluación de la misma en función de la actividad que esté desarrollando. Conociendo en qué nivel de actividad se encuentra el individuo, con una tabla que se detallará más adelante. Se podrá evaluar el calor metabólico que esta actividad generaría (met).
- Nivel de vestimenta (I_{clo}). Cuanta más nivel de vestimenta, mayor será la resistencia que opone a la conducción del calor a través de la misma, dependiendo de si es beneficioso o no.
- Temperatura rectal (T_{re}). Será necesaria para el cálculo de la temperatura de la piel, entre otros factores. Es la calibración de la temperatura corporal más exacta.

3.2 Hipótesis

3.2.1 Hipótesis iniciales

- Se simplifica imaginativamente la forma de la figura geométrica del cuerpo humano, con el objetivo de simplificar los cálculos de la interacción radiante. Las formas geométricas más simples y conocidas son: el cubo, la esfera, el cilindro, y conforme a la anatomía humana, se podría entender como un paralelepípedo regular de base cuadrangular, en el que cada lateral supone un 22% de la superficie corporal y la cara superior e inferior un 6% cada una de ellas.
- La tasa de almacenamiento de calor, tanto en el núcleo como en la piel se considerará nula.



3.2.2 Hipótesis adicionales

En el punto 4.1.1.3, donde se especifica el cálculo de la temperatura de la piel, surge esta hipótesis adicional, en el planteamiento del modelo, al tener dos opciones para el cálculo de la misma. Se considera como hipótesis ya que cada fórmula procede de una fuente, y son requeridas para el cálculo de cada indicador de manera independiente. Será clave conocer de manera clara en qué momento hay que hacer uso de cada expresión.

4 MODELO DE CONFORT

La sensación térmica se puede definir como el grado de incomodidad que percibe un ser humano ante unas condiciones climatológicas determinadas. Evaluada positivamente, se denomina bienestar térmico al grado satisfactorio de confort, es decir, este se consigue al tener una sensación térmica neutra.

Es cierto que el concepto de confort térmico en exteriores, es un término de evaluación en el que se tienen en cuenta múltiples factores y enfoques, tanto físicos, como fisiológicos, como psicológicos. (*ASHRAE Fundamental 2017. SI Edition [1]*).

En el caso del enfoque psicológico, se trata de un enfoque bastante subjetivo, en el que además influyen cuestiones como el “historial térmico” de cada individuo (*Nikolopoulou et. Al, 2001*), es decir, las condiciones térmicas a las que se ha visto expuesto en momentos anteriores. A modo de ejemplo, si se ha estado expuesto a unas condiciones muy cálidas durante unos días, se desea que el tiempo sea más fresco, y viceversa. Por tanto, influye la experiencia térmica anterior.

Sin embargo, a pesar de tener factores subjetivos, se ha de buscar una forma de unificar criterios y evaluar el confort térmico de manera más objetiva. La adaptación fisiológica es generada por el cuerpo humano de manera involuntaria e inconsciente. Es lo que se conoce como termorregulación humana que disipa el calor generado por la actividad metabólica del cuerpo, con el fin de que la temperatura corporal no alcance valores críticos, incluso perjudiciales para la salud (*ASHRAE, 2017 [1]*).

Esta respuesta térmica del cuerpo humano ante las condiciones existentes en cada emplazamiento se define mediante un **balance energético**. En la *Figura 4*, se representan los flujos de calor presentes en la interacción del cuerpo humano con el entorno, es decir, con los pavimentos, las fachadas y la vegetación que le rodea.

Los modelos de confort se emplean para predecir el confort que desarrolla una persona ante unas condiciones climatológicas determinadas, al estudiar la respuesta corporal o sensaciones térmicas que produce. Esto se verá reflejado en ciertas variables, que se denominan índices de confort, que ayudará a determinar si un individuo está sometido a unas perturbaciones admisibles o si, por el contrario, sufriría un estrés térmico que harían insoportable la permanencia en ciertas estancias con duras condiciones exteriores durante un tiempo prolongado.

El balance energético comentado anteriormente se entiende como un modelo de confort de un solo nodo al considerar que el cuerpo humano está a una única temperatura, siendo esta la temperatura de la piel. Sin embargo, existen otros modelos de confort, como es el caso del modelo de dos nodos de *Pierce (1970)*, y posteriormente el modelo de doble nodo de KSU desarrollado por en la Universidad de Kansas, en el que se concibe el cuerpo humano como dos compartimentos isoterms: el núcleo (o core) en donde se genera el calor metabólico, y la piel. Este modelo, al diferenciar dos zonas, requeriría de dos balances energéticos, que se intercambian calor entre ellos por conducción pasiva desde el núcleo hasta la piel, variando en función del flujo sanguíneo.

En este caso, en el presente documento se va a desarrollar el modelo de confort de nodo único, cuyo uso se hace más académico al caracterizarle una mayor simplicidad.

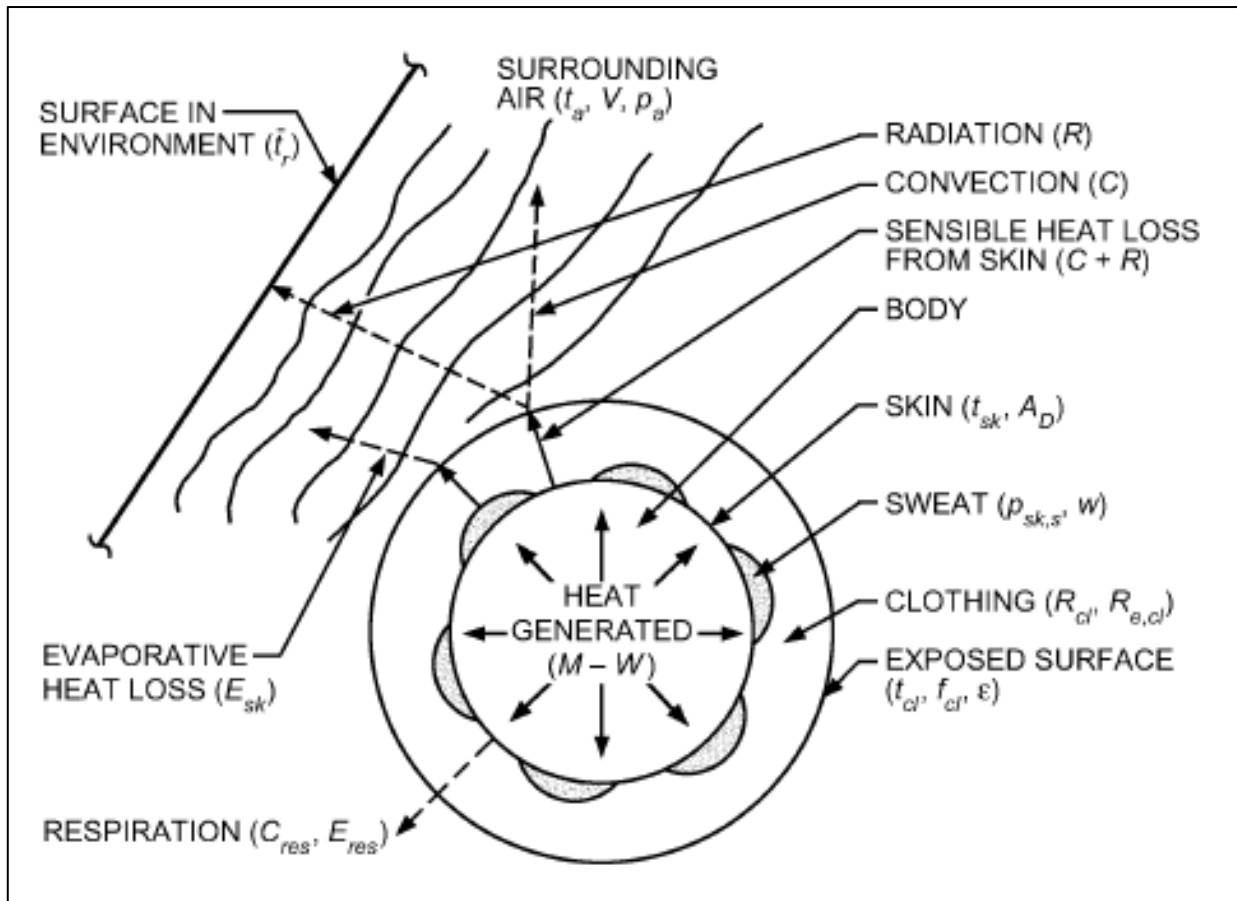


Figura 4. Interacción humana con el entorno. (2017 ASHRAE Handbook – Fundamentals (SI)) [1]

4.1 Algoritmo

A continuación, se va a detallar el modelo matemático de confort, con cada una de las ecuaciones que lo conforman, y más datos de interés. En los puntos finales de esta memoria se podrá observar la implementación de dichas ecuaciones en el software utilizado.

4.1.1 Metabolismo y balance térmico

La tasa metabólica comentada anteriormente, mide el gasto energético que experimenta una persona al realizar una tarea. La mayor parte de esta energía se convierte en calor (M), mientras que el restante se aprovecha para realizar trabajo (W). La tasa metabólica depende del tipo de actividad que se esté desarrollando. Como se muestra en la *Tabla 1*, la diferencia entre los valores estimados para una actividad ligera como es el caso de “De pie, relajado” y una actividad física más intensa, como puede ser “Caminando 6,4 km/h”, es bastante notable. Cuanto más duro sea el trabajo, mayor será el calor metabólico y más esfuerzo tendrá que realizar el cuerpo para mantener la temperatura del organismo constante.

La unidad empleada para expresar la tasa metabólica, es el **met** (*metabolic equivalent of task*), y una unidad equivale a 58,1 W/m² [1]. Su valor puede ser calculado de una forma más exacta, ya que la equivalencia comentada está basada en un cuerpo de altura 1,73 m y un peso de 70 kg, de género masculino.

$$M \left[\frac{W}{m^2} \right] = 58,1 * met \quad (1)$$

ACTIVIDAD	W/m2	met
Descansar		
Durmiendo	40	0,7
Recostado	45	0,8
Sentado, quieto	60	1,0
De pie, relajado	70	1,2
Caminar		
3,2 km/h	115	2,0
4,3 km/h	150	2,6
6,4 km/h	220	3,8
Actividad de oficina		
Leyendo, sentado	55	0,9
Escribiendo	60	1,0
Escribiendo a máquina	65	1,1
Presentando, sentado	70	1,2
Presentando, de pie	80	1,4
Caminando	100	1,7
Elevando/Embalando	120	2,1

Tabla 1. Calor generado en cada actividad física [1]

Con respecto al calor restante que se aprovecha para realizar trabajo, se puede definir la eficiencia mecánica como la relación que existe entre M y W. En la mayoría de las actividades, se pueden tomar valores cercanos a 0 de dicha eficiencia, ya que el trabajo mecánico es bastante pequeño en comparación con la tasa metabólica.

$$\mu = \frac{W}{M} \sim 0 \quad (X) \rightarrow W \sim 0 W/m^2 \quad (2)$$

Finalmente, el calor neto generado en el interior del cuerpo humano, debe de ser disipado mediante otros mecanismos de transferencia de calor que se comentarán a continuación. Dichos flujos son los siguientes:

- Radiación solar absorbida de la que incide sobre la superficie del cuerpo (directa, difusa y reflejada por otras superficies) (R_C)
- Intercambio radiante de larga longitud de onda con las superficies que rodean (R_L)
- Intercambio por convección entre la superficie del cuerpo y el aire ambiente (C)
- Pérdidas de calor sensibles respiratorias (q_{res})
- Pérdidas de calor por sudoración y por difusión del vapor de agua a través de la piel (E_{sk})

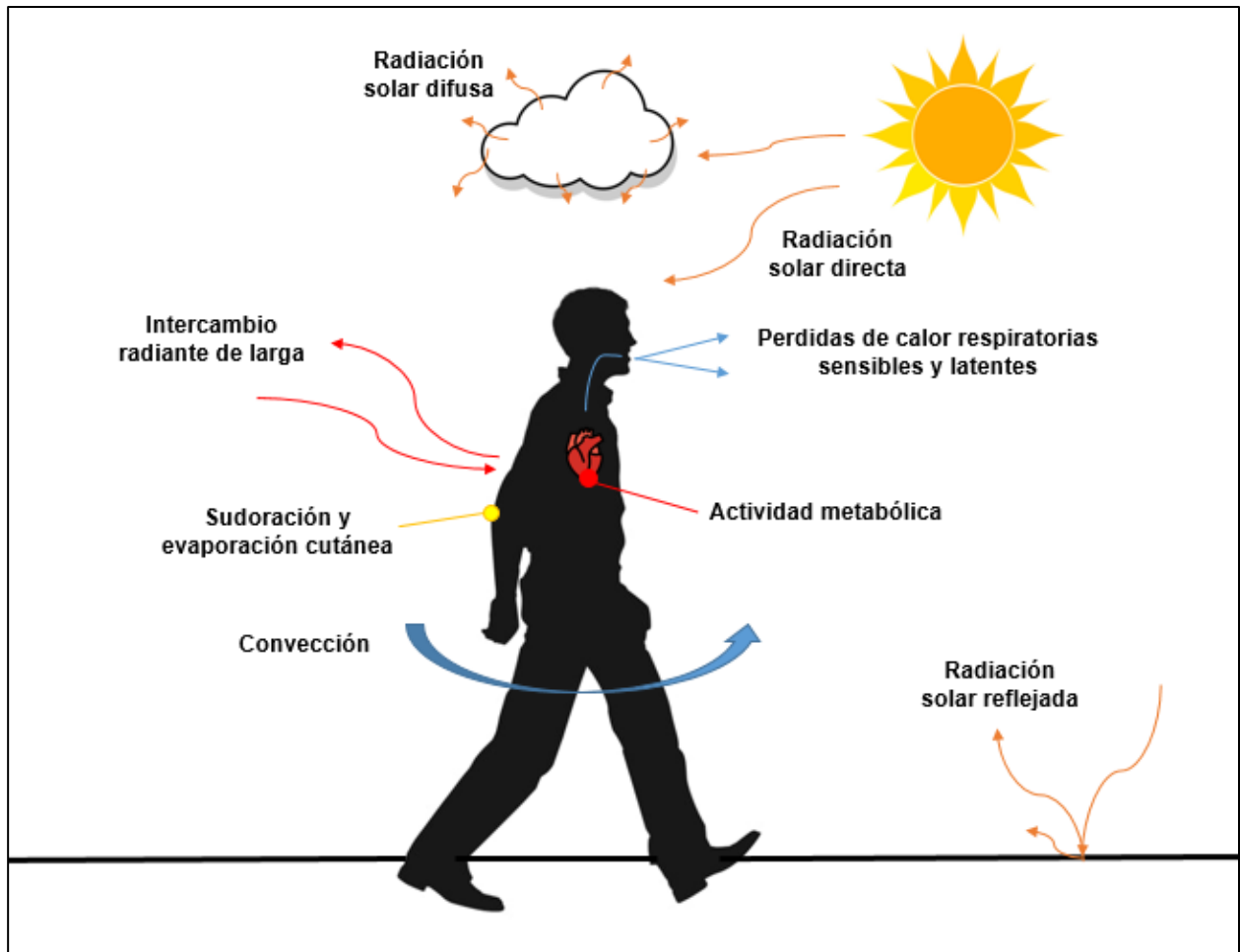


Figura 5. Representación flujos de intercambio de calor

De este modo, el balance térmico se puede expresar como (*Ecuación 3, [1]*):

$$M - W = q_{sk} + q_{res} + S = (C + R + E_{sk}) + (C_{res} + E_{res}) + (S_k + S_{cr}) \quad (3)$$

Según la *Ecuación 3* del balance energético, S representa la tasa de almacenamiento de calor corporal, la variación del contenido de calor en el cuerpo ante desequilibrios, diferenciando entre la cantidad almacenada en la piel y en el núcleo. Sin embargo, como se ha comentado al inicio, se va a desarrollar un modelo de nodo único que no almacena calor, por lo que se despreciará el término del almacenamiento.

En los siguientes puntos se explicarán cada uno de los flujos de calor presentes en el modelo de confort.

4.1.2 Pérdidas de calor sensible

El intercambio por **convección** es un intercambio que se produce entre el cuerpo y el aire que rodea al individuo. Se ven influenciados principalmente por la temperatura del aire y por la velocidad del aire, de hecho, la magnitud del intercambio se verá incrementado a medida que aumenta la velocidad del aire. Tal y como se muestra en la *Ecuación 4*, el flujo de calor, que depende de la diferencia de temperaturas, puede tener ambos sentidos, es decir, si la temperatura de la ropa (T_{cl}) es mayor que la del aire, se pierde calor, mientras que, si la temperatura del aire es mayor, se gana calor.

$$C = f_{cl} h_c (T_{cl} - T_a) \quad (4)$$

Este flujo, y a continuación se verán otros términos influenciados por el mismo factor, está afectado por un factor corrector, f_{cl} , que representa la relación existente entre el área de ropa que cubre el cuerpo, y el área de piel. Además, el coeficiente convectivo de transferencia se puede calcular mediante diversas correlaciones, según qué actividad esté realizando el individuo. En este caso se va a plantear una persona que está andando al aire libre. Según *Nishi y Gagge (1970)* [1], dicho coeficiente se calcula en función de la velocidad del aire.

$$h_c = 8,6V^{0,53} \quad [W/m^2K] \quad (5)$$

Ecuación	Límites	Condiciones	Fuente
$h_c = 8,6V^{0,6}$	$0.2 < V < 4.0$	Sentado con aire en mvto.	Mitchell (1974)
$h_c = 5.7(M - 0.8)^{0,39}$	$1.1 < M < 3.0$	Activo en aire quieto	Gagge et al. (1976)
$h_c = 6.5V^{0,39}$	$0.5 < V < 2.0$	Caminando en aire quieto	Nishi and Gagge (1970)
$h_c = 14.8V^{0,69}$	$0.15 < V < 1.5$	De pie con aire en mvto.	Seppänen et al. (1972)

Tabla 2. Otras ecuaciones para coeficiente de transferencia por convección [1]

En el caso del intercambio **radiante**, se trata del intercambio que se produce entre la persona y los objetos que le rodean, ya que todos los cuerpos por el simple hecho de estar a una temperatura determinada, emiten radiación. En este caso, se tendrá en cuenta la radiación mediante una variable denominada temperatura radiante media (T_{RM}). De igual manera que en conducción, si la temperatura corporal es mayor que la temperatura radiante media, se pierde calor y viceversa.

$$R = f_{cl} h_r (T_{cl} - T_{RM}) \quad (6)$$

El coeficiente de transferencia radiante, se calcula como:

$$h_r = 4\varepsilon\sigma \frac{A_r}{A_D} \left(273,2 + \frac{T_{cl} - T_{RM}}{2} \right)^3 \quad (7)$$

La emisividad de la piel tiene valores cercanos a la unidad (0,9÷0,95). Sin embargo, dicha expresión es válida si se conoce la temperatura de la ropa. Es por ello que se emplea una aproximación, al tener un valor razonablemente constante, cercano a 4,7 W/m², influenciado por la emisividad comentada (ASHRAE, 2017 [1]).

$$h_r = 4,7\varepsilon \quad (8)$$

4.1.2.1 Temperatura radiante media

La temperatura radiante media se define como una temperatura “imaginaria” que debe tener un recinto para que se pueda intercambiar la misma cantidad de calor solo por radiación que en la situación de partida.

Para conocer la temperatura radiante media, se debe tener en cuenta el efecto que tiene tanto la radiación de larga como la radiación de corta. La radiación de onda corta es la recibida directa o indirectamente del sol, mientras que la radiación de onda larga es una radiación terrestre, emitida por la Tierra y los gases que componen la atmósfera. Por tanto, la temperatura radiante media se puede considerar como la suma de ambas temperaturas radiantes.

$$T_{RM} = T_{rsolar} + T_{rlarga} \quad (9)$$

De toda la radiación que recibe una persona, parte es absorbida, parte es reflejada y parte es transmitida directamente hacia la piel.

Según *J.Pickup y R. de Dear* en su artículo [12] (*An Outdoor Thermal Comfort Index OUT_SET**, 2019), en cierto momento, la temperatura radiante media se puede emplear como un índice de confort en exteriores. Proponen un modelo de cálculo de dicha temperatura, en la que en una primera aproximación se supone que toda la radiación que no es reflejada por la ropa, es transmitida y absorbida por la piel.

Este modelo, calcula la radiación absorbida por el cuerpo, distinguiendo entre la radiación directa, la difusa y la reflejada.

- La radiación **directa** influye únicamente en la parte de la superficie del cuerpo que participa en el intercambio directamente, es decir, en la que no haya ninguna vestimenta que cubra y se interponga en el contacto. Este factor se denomina factor de área proyectada y se calcula en función de la altura solar (β).

Según el libro de Oke (*Urban Climates*, 2017 [11]), se considerará la persona como un cilindro cuyas dimensiones son las del cuerpo humano de Dubois (se comentará su expresión a continuación), y la cantidad de radiación que recibe la persona directamente depende de qué parte del cuerpo es vista por el sol, como se ha comentado anteriormente. El área expuesta se estima en función del área de la sombra que se genera el obstáculo:

$$A_s = (2rh)cot\beta + \pi r^2 \quad (10)$$

Donde r es el radio del cilindro que constituye la persona de manera aproximada, h la altura de la persona y la cotangente la inversa de la tangente. Esta expresión se puede expresar en función de θ , siendo este el ángulo restante de la diferencia entre el ángulo recto y la altura solar.

$$A_s = (2rh)tan\theta + \pi r^2 \quad (11)$$

Finalmente, para calcular la radiación incidente, se empleará dicha área de la sombra que produce la persona, y se tendrá en cuenta la radiación horizontal incidente en la superficie sobre la que se sitúa la persona.

$$RD(W) = A_s \cdot Rad_{sup \text{ donde está la persona}} \quad (12)$$

Por último, puesto que se desea expresar la radiación absorbida por unidad de superficie, se referirá al área de DuBois:

$$A_{Dubois} = 0,007184m^{0,425}h^{0,725} \quad (13)$$

$$RD\left(\frac{W}{m^2}\right) = \frac{A_s \cdot Rad_{sup \text{ donde está la persona}}}{A_{DuBois}} \quad (14)$$

Donde m es la masa corporal de la persona y h su altura.

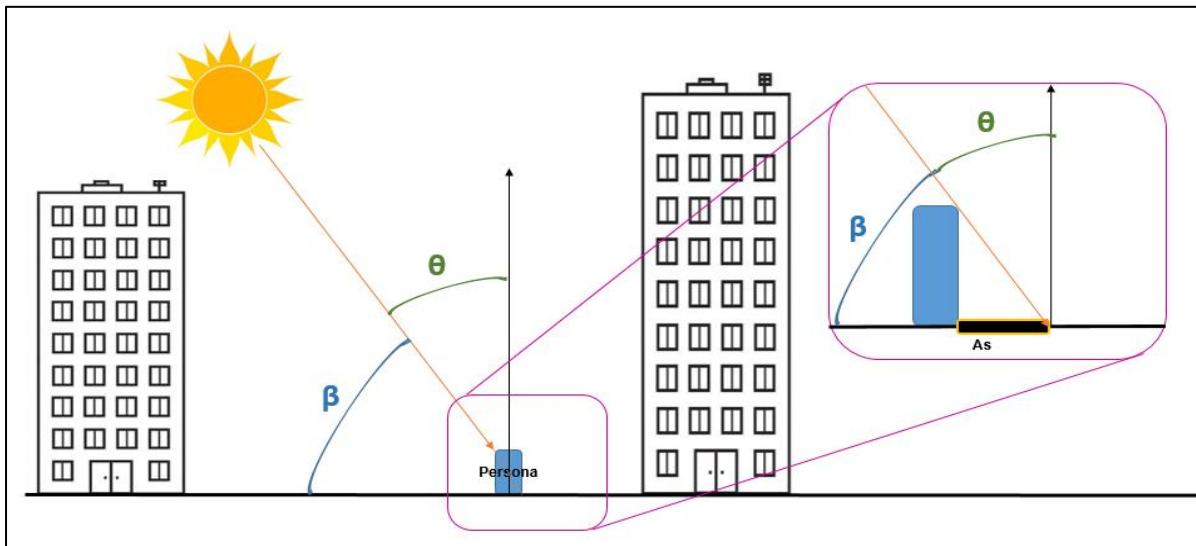


Figura 6. Cálculo de la sombra proyectada por una persona (2D)

- La radiación **difusa**, según *J.Pickup* y *R. de Dear*, influye sobre cierto porcentaje del total del área corporal que depende de la postura de la persona. Por ejemplo, el área del cuerpo de la parte interna de las extremidades no es un área efectiva, puesto que no ve ninguna superficie adicional con la que intercambiar. A este porcentaje del área corporal se le denomina factor de área efectiva (F_{EFF}) y puede tomar valores alrededor de 0,75.

De esta forma, la radiación difusa absorbida se calcula como un porcentaje del total teniendo en cuenta tanto el factor de área efectiva, como el albedo.

El albedo (α) se define como el porcentaje de radiación reflejada por una superficie con respecto al total de radiación que índice sobre ella. El valor restante hasta la unidad sería la cantidad absorbida. Por tanto, la cantidad de radiación difusa que es absorbida se verá influenciada por este factor y por el factor de área proyectada.

$$Rd = F_{EFF}(1 - \alpha)D \quad [W/m^2] \quad (15)$$

Siendo D la cantidad de radiación difusa total en W/m².

- Al igual que la difusa, la radiación **reflejada** también se relaciona con el área del cuerpo efectiva, pero esta vez teniendo en cuenta toda la radiación, tanto la directa como la difusa reflejada, ponderada por la cantidad que es reflejada según el albedo de la superficie, como puede ser el caso del suelo (ground).

$$Reflejado = F_{EFF}(1 - \alpha)(D + S)\alpha_{GND} \quad [W/m^2] \quad (16)$$

Una vez conocida la radiación que en la primera aproximación sería absorbida por la piel y que contribuirían directamente en las ganancias de calor sobre el individuo, se vería disminuida por el hecho de que existe una cámara de aire entre la ropa y la piel, induciendo a un movimiento de aire que disiparía parte de dicho calor. Esto se representa mediante un factor denominado **eficiencia de calentamiento** de la radiación solar (U).

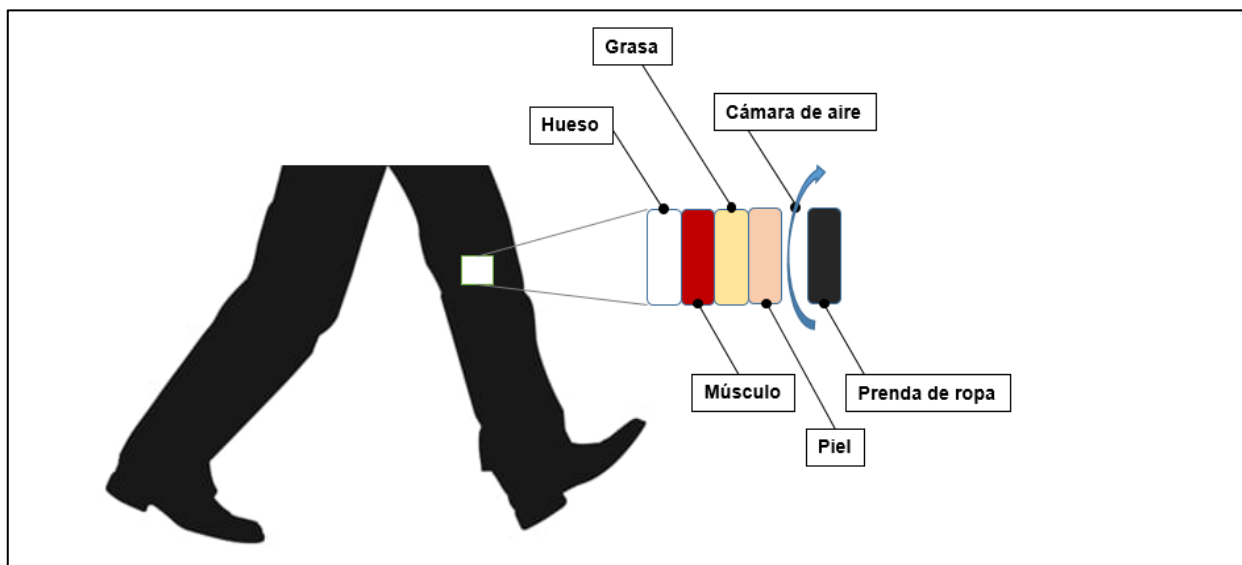


Figura 7. Representación de la cámara de aire

Dicha eficiencia se calcula en función del aislamiento intrínseco de la ropa (I_{clo}), el factor de área vestida (f_{cl}) y del aislamiento de la capa de aire (I_a).

$$U = \frac{I_a}{f_{cl} \left(I_{clo} + \frac{I_a}{f_{cl}} \right)} \quad (17)$$

Tanabe et al. [15] determinó, al exponer un maniquí desnudo a velocidades de aire en un rango entre 0,1 y 1,4 m/s, que el aislamiento de la capa de aire disminuye con el aumento de la velocidad del aire, ya que el movimiento del aire en la cámara entre la ropa y la piel disipa parcialmente el calor. La variación del aislamiento se expresa como:

$$I_a = 0,3767 - 0,3225 \log(V) \quad (18)$$

Iclo	V (m/s)	U
0,2	0,1	0,8357
0,2	0,2	0,8028
0,2	0,3	0,7766
0,2	0,4	0,7534
0,2	0,5	0,7318
0,2	0,6	0,7111
0,2	0,7	0,6909
0,2	0,8	0,671
0,2	0,9	0,6512
0,2	1	0,6313
0,2	1,1	0,6113
0,2	1,2	0,591
0,2	1,3	0,5704
0,2	1,4	0,5494
0,4	0,1	0,7178
0,4	0,2	0,6706
0,4	0,3	0,6348
0,4	0,4	0,6044
0,4	0,5	0,577
0,4	0,6	0,5517
0,4	0,7	0,5278
0,4	0,8	0,5049
0,4	0,9	0,4828
0,4	1	0,4612
0,4	1,1	0,4402
0,4	1,2	0,4194
0,4	1,3	0,399
0,4	1,4	0,3787
0,6	0,1	0,6291
0,6	0,2	0,5758
0,6	0,3	0,5368
0,6	0,4	0,5046
0,6	0,5	0,4763
0,6	0,6	0,4507
0,6	0,7	0,4269
0,6	0,8	0,4047
0,6	0,9	0,3836
0,6	1	0,3634
0,6	1,1	0,3439
0,6	1,2	0,3251
0,6	1,3	0,3068
0,6	1,4	0,2889

Tabla 3. Valores de la eficiencia de calentamiento (U)

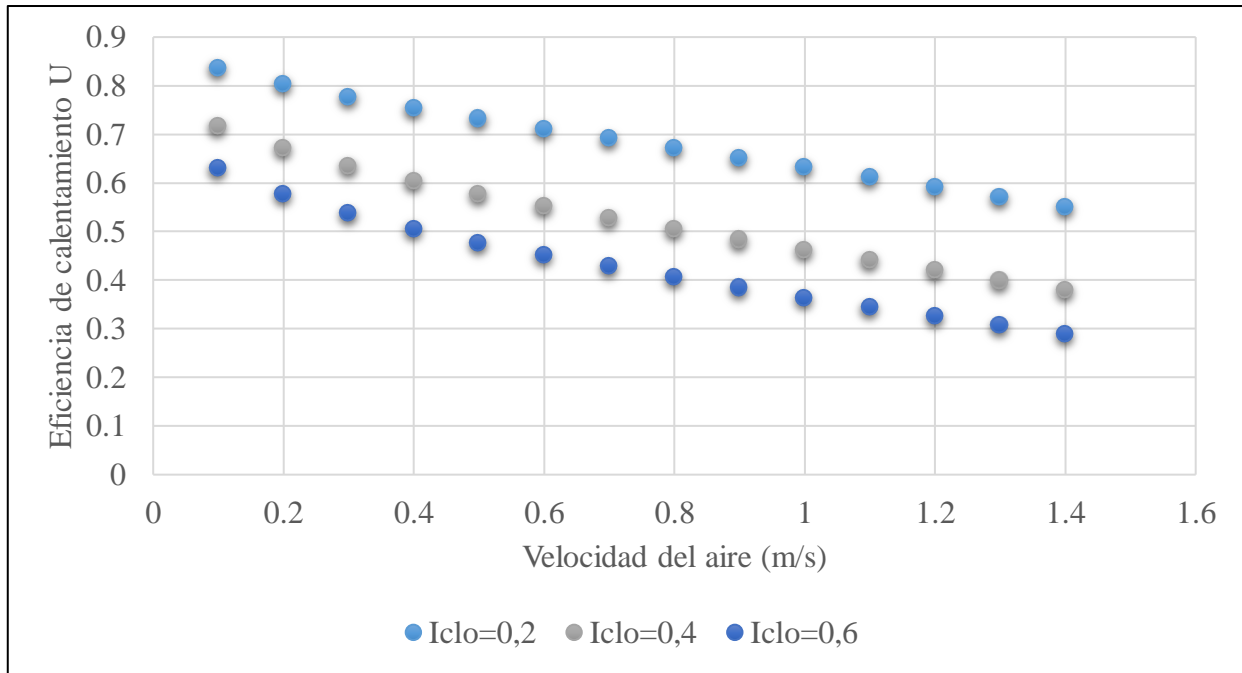


Gráfico 1. Sensibilidad eficiencia de calentamiento (U)

Como se aprecia en el *Gráfico 1*, al aumentar el nivel de vestimenta (I_{clo}), disminuye la eficiencia de calentamiento para una misma velocidad del aire y con ello las ganancias de calor por radiación sobre el individuo. Adicionalmente, se muestra cómo disminuye este factor al aumentar la velocidad del aire. Para un rango de vestimenta adecuado para régimen de verano entre 0,3 y 0,6 se tiene una eficiencia de calentamiento entre 0,7 y 0,3. Es lógico pensar que para una resistencia de la vestimenta superior alrededor de la unidad y para unas velocidades de aire medias-altas, no habrá apenas radiación absorbida en la piel, pues la eficiencia de calentamiento será aproximadamente nula.

Una vez conocida la cantidad de radiación solar que absorbe la piel, se podría conocer la temperatura radiante solar, es decir, la de onda corta, corregido por la eficiencia de calentamiento.

$$T_{rsolar} = \frac{(RD + Rd)(1 - \alpha_{cl})U}{h_r} \quad (19)$$

Esta temperatura se sumaría a la radiante media que caracteriza los flujos radiantes de onda larga para obtener la temperatura radiante media total.

4.1.2.2 Temperatura operativa

Se denomina **temperatura operativa** a la temperatura de un recinto “imaginario” en el que se intercambiaría la misma cantidad de calor por radiación y convección que en el entorno real con una temperatura seca del aire y una temperatura radiante media. Se calcula de manera ponderada por sus respectivos coeficientes de transferencia.

$$T_o = \frac{T_a h_c + T_{RM} h_r}{h_c + h_r} \quad (20)$$

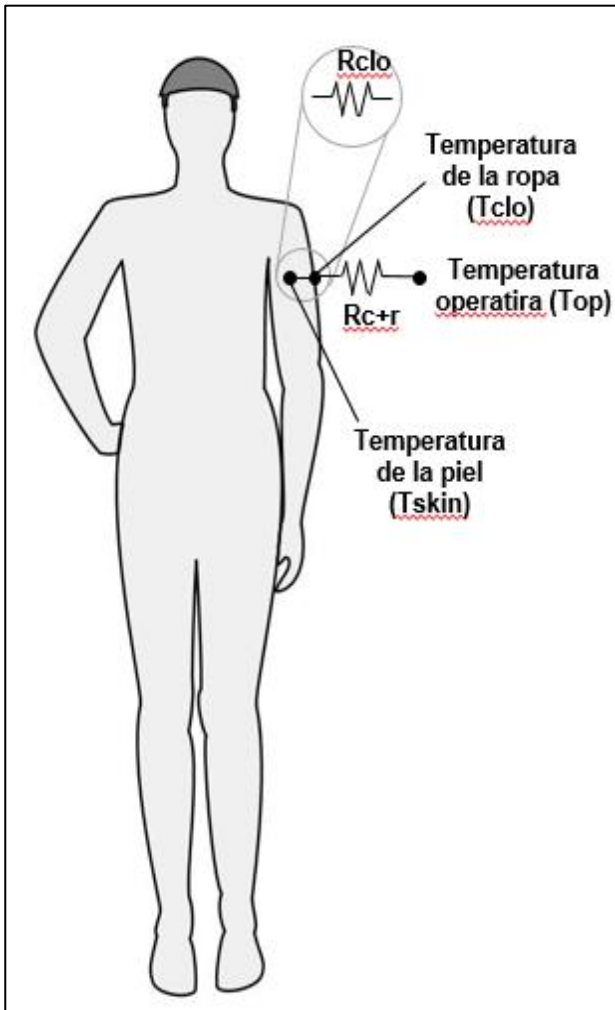


Figura 8. Esquema diferencia entre temperatura de la piel, temperatura de la ropa y temperatura operativa

Dicha temperatura operativa sirve para tratar los intercambios de calor por convección y radiación de manera conjunta, como pérdidas de calor sensible desde la piel. Adicionalmente, el coeficiente de transferencia total será la suma de ambos.

$$C + R = f_{cl} h_{cr} (T_{cl} - T_o) \quad (21)$$

$$h_{cr} = h_c + h_r \quad (22)$$

Por otro lado, tal y como se puede ver en la Figura 8, la pérdida de calor sensible también se puede expresar, como se conoce de los fenómenos de transferencia de calor como una diferencia de temperaturas entre la piel (T_{sk}) y la ropa (T_{cl}), entre la resistencia térmica que ejerce la ropa.

$$C + R = \frac{T_{sk} - T_{cl}}{R_{cl}} \quad (23)$$

El **clo** es una unidad de medida que define el aislamiento térmico que proporciona la ropa sobre la piel (I_{clo}). Valores del clo cercanos a cero corresponde a una persona desnuda, y conforme más ropa lleve, mayor será el valor de dicho parámetro. Por consiguiente, se mide la resistencia térmica de la vestimenta (R_{cl}) en función de este parámetro, es decir, 1 clo equivale a $0,155 \text{ m}^2\text{K/W}$.

$$R_{cl} = 0,155 I_{clo} \quad [\text{m}^2\text{K/W}] \quad (24)$$

Combinando ambas expresiones de las pérdidas sensibles (Ecuación 21 y Ecuación 23), finalmente se puede definir como una diferencia de temperaturas entre la piel y la temperatura operativa exterior, afectado por una resistencia térmica combinada entre los efectos de la vestimenta y de las condiciones exteriores.

$$C + R = \frac{T_{sk} - T_o}{R_{cl} + 1/(f_{cl} h_{cr})} \quad (25)$$

Descripción de la vestimenta	Iclo
Pantalones cortos, camisa de manga corta	0,36
Pantalones, camisa de manga corta	0,57
Pantalones, camisa de manga larga	0,61
Pantalones, camisa de manga larga + chaqueta de traje	0,96
Igual que el anterior + chaleco y camiseta	1,14
Pantalones, camisa de manga larga, suéter de manga larga, camiseta	1,01
Igual que el anterior + chaqueta de traje y calzoncillos largos de ropa interior	1,3
Pantalones deportivos, sudadera	0,74
Pijama de manga larga, pijama largo de pantalones, bata de manga 3/4 y pantuflas	0,96
Falda hasta la rodilla, camisa de manga corta, medias y sandalias	0,54
Falda hasta la rodilla, camisa de manga larga, medias	0,67
Falda hasta la rodilla, camisa de manga larga, medias, suéter de manga larga	1,1
Igual que el anterior, pero en lugar de suéter, chaqueta de traje	1,04
Falda hasta los tobillos, camisa de manga larga, chaqueta de traje, medias	1,1
Mono de manga larga, camiseta	0,72
Mono, camisa de manga larga, camiseta	0,89
Mono, de manga larga, ropa interior térmica, ropa interior larga	1,37

Tabla 4. Aislamiento térmico para diferentes niveles de vestimenta (clo) [1]

4.1.2.3 Temperatura de la piel

Al no quedar la fisiología real caracterizada, existe una única temperatura de piel que se obtiene de fórmulas empíricas, constante y uniforme en todo el cuerpo humano.

Por un lado, se puede calcular la temperatura media de la piel, como se explica en la norma *UNE-EN ISO 7933:2004 [2]*, en función de ciertos parámetros que determinan la situación en la que se encuentra una persona.

Es importante resaltar que se diferencia el cálculo para tres rangos de nivel de vestimenta:

- Para $I_{clo} \leq 0,2$ la temperatura de la piel en equilibrio con las condiciones exteriores para un nivel bajo de vestimenta (cercano a la desnudez o *nude*)

$$T_{skeqnu} = 7,19 + 0,064T_a + 0,061T_{RM} - 0,348V + 0,198P_a + 0,000M + 0,616T_{re} \quad (26)$$

- Para $I_{clo} \geq 0,6$ la temperatura de la piel en equilibrio con las condiciones exteriores para un nivel alto de vestimenta (*clothing*)

$$T_{skeqcl} = 12,17 + 0,02T_a + 0,044T_{RM} - 0,253V + 0,194P_a + 0,005346M + 0,51274T_{re} \quad (27)$$

Siendo T_{re} la temperatura rectal (°C) y P_a la presión de vapor de agua en el aire.

- Para I_{clo} comprendido entre 0,2-0,6 se calculará de manera ponderada entre las dos anteriores

$$T_{sk2} = T_{skeqnu} + 2,5(T_{skeqcl} - T_{skeqnu})(I_{cl} - 0,2) \quad (28)$$

Por otro lado, se puede calcular la temperatura de la piel directamente en función del nivel de actividad y de vestimenta:

$$T_{sk} = 29,55 + 0,196T_{sa} - \left(\frac{1,064M}{58,15}\right)(1 - 0,296I_{clo}) \quad (29)$$

La temperatura (T_{sa}) se conoce como temperatura sol-aire, que se corresponde exactamente con la temperatura operativa.

Tal y como se ha añadido en las hipótesis, se emplearán ambas fórmulas del cálculo de la temperatura de la piel, debido a que según la bibliografía se requieren de ambas expresiones en casos diferenciados.

4.1.2.3.1 Análisis de sensibilidad

Para conocer la sensibilidad que tienen ambas ecuaciones de obtención de la temperatura de la piel, se ha realizado un análisis, evaluándolas para los siguientes casos:

- Clo: [0.2, 0.4, 0.6] clo
- Met: [1, 2, 3] met
- Temperatura exterior: [26, 28, 30, 32, 34, 36, 38, 40] °C

Con estos datos, se calculan 72 casos representados en los siguientes gráficos.

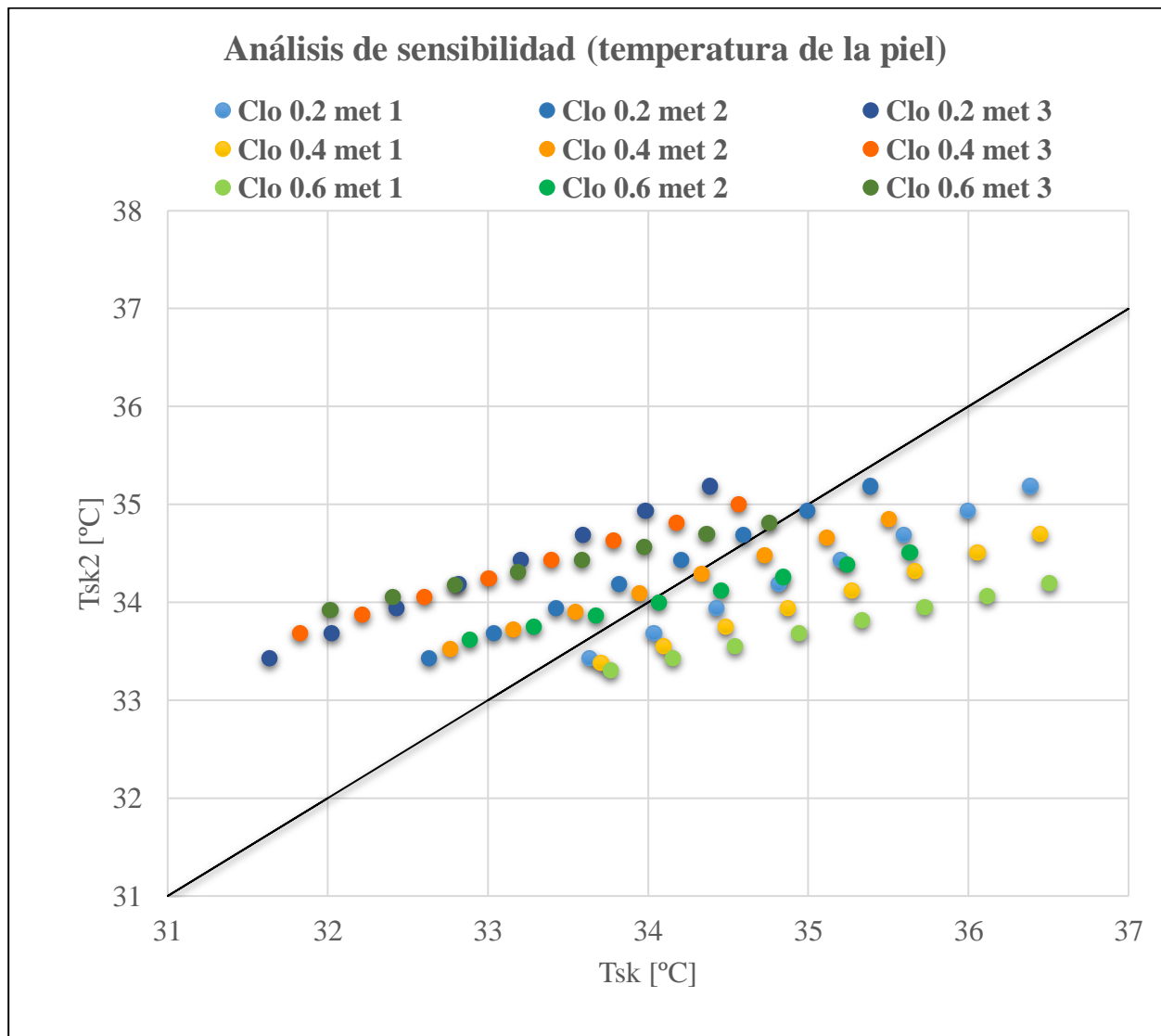


Gráfico 2. Análisis de sensibilidad temperatura de la piel

En el *Gráfico 2*, se han representado todos los casos estudiados. Cada gama de colores representa un clo determinado (azul clo 0.2, naranja clo 0.4 y verde clo 0.6). Se ha representado un cálculo de la temperatura de la piel frente a la otra, para comparar dichos valores. De ser la temperatura calculada mediante la primera *Ecuación 28* superior a la segunda (*29*), se representará por encima de la diagonal representada y viceversa. Como se puede observar, conforme aumenta el met para un mismo clo, se desplazan los puntos hacia la izquierda, quedando por encima de la diagonal, de manera que la variación del nivel metabólico influye más en la *Ecuación 28*.

Para met constante, al aumentar el clo, los resultados se parecen más entre sí, de ahí que la dispersión de puntos sea más concentrada. Adicionalmente, para met 1, los valores calculados mediante la *Ecuación 29* son mayores que los calculados mediante la *Ecuación 28*, mientras que para clo 0.4, los cocientes entre ambos cálculos serán aproximadamente la unidad (valores muy próximos entre sí). Como consecuencia se deduce que la temperatura Tsk2, se ve más influenciada por clo a medida que este aumenta, puesto que para clo 0.6 los puntos quedan por encima de la diagonal.

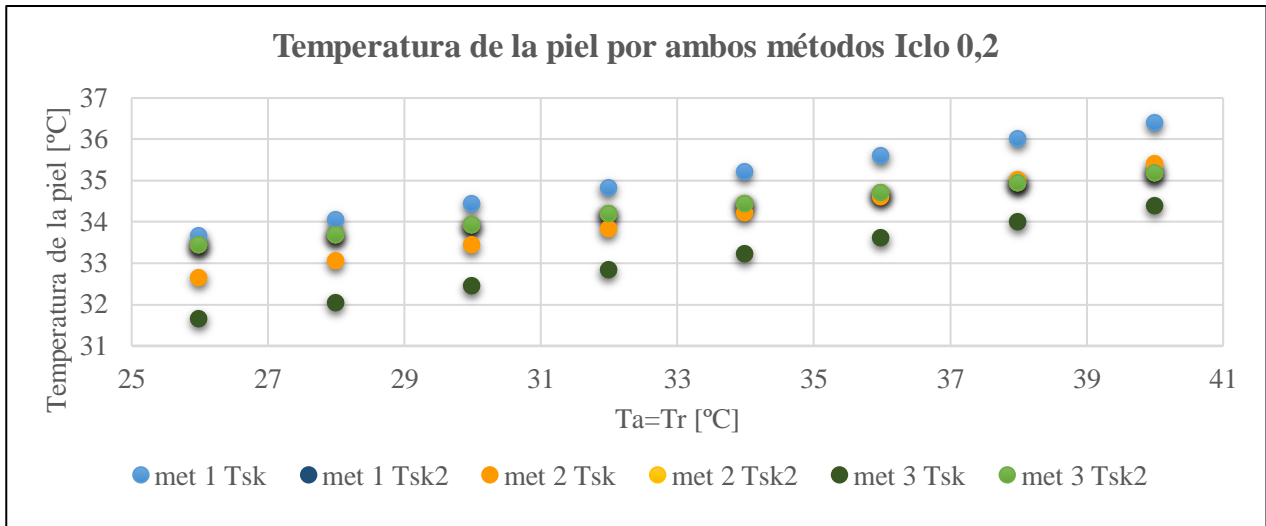


Gráfico 3. Análisis de sensibilidad temperatura de la piel para clo 0.2

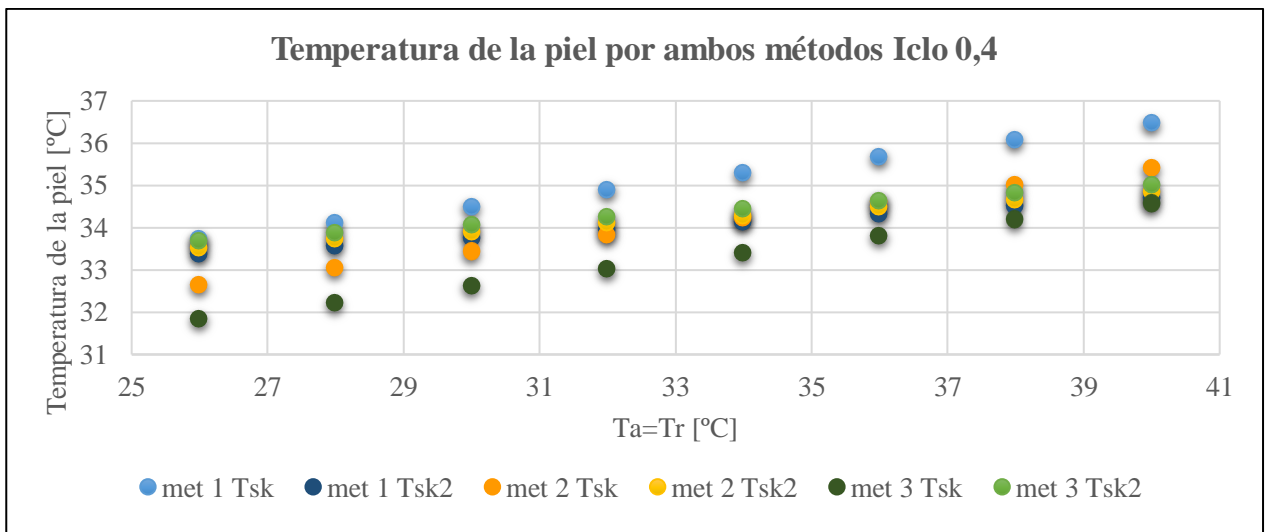


Gráfico 4. Análisis de sensibilidad temperatura de la piel para clo 0.4

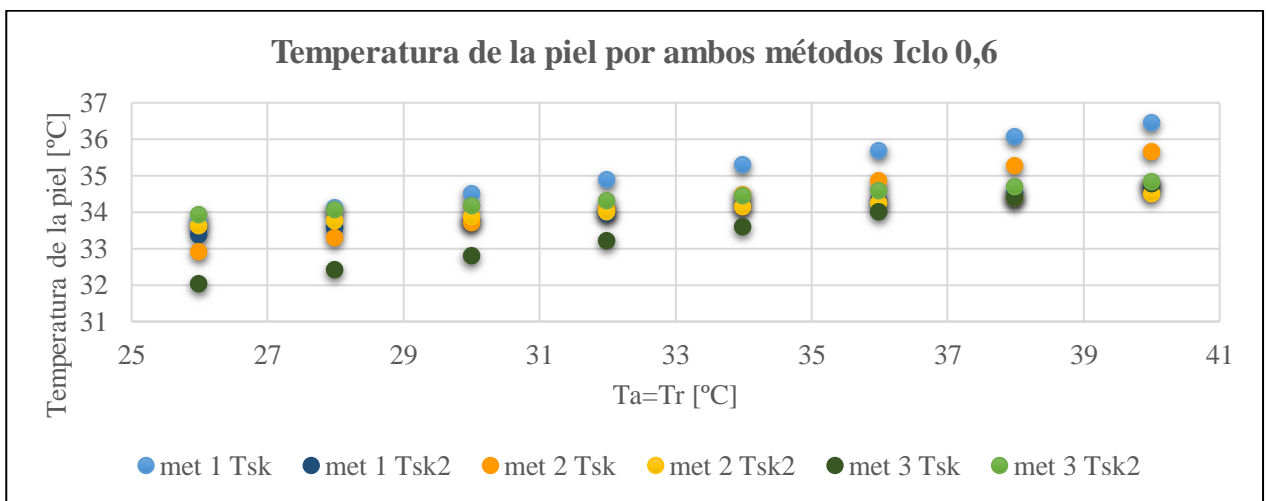


Gráfico 5. Análisis de sensibilidad temperatura de la piel para clo 0.6

En estos tres últimos gráficos se ha representado los mismos valores, pero de manera desglosada para cada nivel de vestimenta, frente a la temperatura exterior. Comparándolos entre ellos, se puede apreciar lo que se ha comentado anteriormente: para niveles bajos de clo (0.2), el met apenas influye en el cálculo de la temperatura mediante la primera opción (28), al estar todos los puntos superpuestos entre sí. Conforme va aumentando el clo, el met influye en mayor medida.

En el caso de los valores calculados mediante la segunda opción, ocurre lo contrario, es decir, la temperatura de la piel varía con respecto al met en este caso, mientras que frente a un aumento del clo, los resultados para un mismo met son razonablemente parecidos.

En verano, el nivel de vestimenta suele tener unos valores cercanos a 0.6. Para este valor, retrocediendo al *Gráfico 2*, existen mayor cantidad de puntos para ese clo por debajo de la recta que por encima, lo que se traduce en que la temperatura Tsk es mayor que la temperatura Tsk2. Por ello, para el cálculo del modelo de confort se va a emplear la Ecuación (28) puesto que es más detallada y tiene en cuenta más factores que resultan relevantes, a pesar de ser la que tiene unos resultados más favorable e inferiores.

4.1.3 Pérdidas de calor respiratoria

El cuerpo humano pierde calor a través de las vías respiratorias, tanto sensible (C_{res}) como latente (E_{res}). Las pérdidas sensibles se producen al exhalar aire caliente que contenemos en el cuerpo humano y las pérdidas latentes al evaporar las partículas de vapor de agua que contiene el aire que respiramos. Ambos términos se pueden calcular de una forma más compleja, sin embargo, se hará de una forma aproximada debido a que, comparando el orden de magnitud de dichas pérdidas con respecto a las demás, son de un orden muy inferior.

Ambas expresiones están en función del metabolismo ya que el consumo de oxígeno en los pulmones está directamente relacionado con el tipo de actividad física que se esté realizando, y con ello el metabolismo.

$$C_{res} = 0,0014M(34 - T_a) \quad (30)$$

$$E_{res} = 0,0173M(5,87 - P_a) \quad (31)$$

Siendo M el metabolismo (W/m^2), y T_a y P_a la temperatura seca y presión de vapor de agua del aire.

El aire que inhalamos, lo tomamos a las condiciones ambiente exteriores. Sin embargo, su paso por los pulmones hace que, al sacar el aliento, el aire salga con una temperatura aproximada a la corporal y prácticamente saturado.

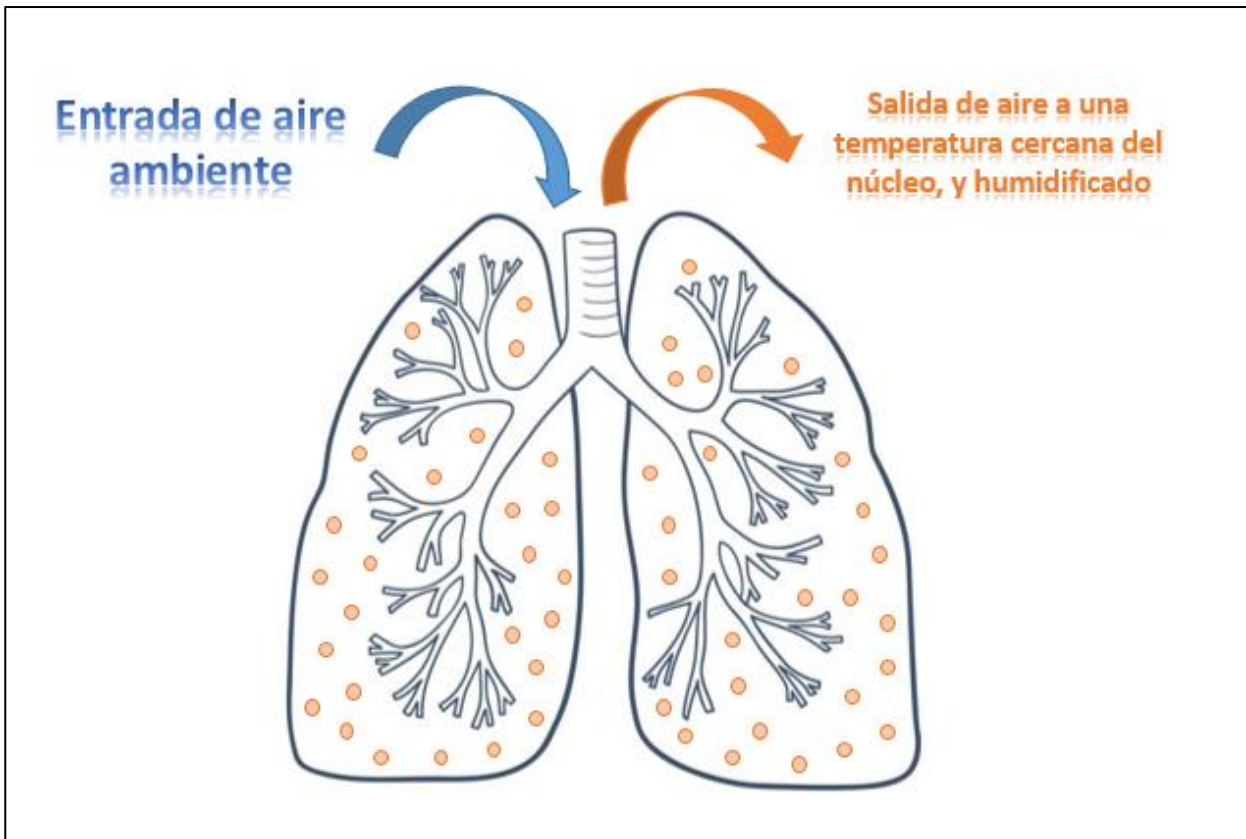


Figura 9. Pérdidas de calor respiratorias

4.1.4 Sudoración y evaporación cutánea

Adicionalmente a todas las pérdidas anteriores, también existe una pérdida de calor latente al evaporarse el vapor de agua en la piel. Por el proceso de secreción, el cuerpo humano expulsa agua, que requiere de una cantidad de energía para evaporarse, y ese aporte de calor es extraído del cuerpo humano, de forma que, como consecuencia de esa sustracción de calor, la temperatura corporal se reduce.

Esta pérdida está relacionada con la saturación del aire, de manera que, si disminuye dicha presión de saturación, se incrementaría la cantidad evaporada, proporcionalmente a la humedad de la piel (w). A su vez, se calcula en función de la diferencia entre la presión de saturación del vapor de agua en la piel (P_{sk}) y presión de vapor de agua del aire ambiente (P_a), ambas expresadas en unidades de kPa [1].

$$E_{sk} = \frac{w(P_{sk} - P_a)}{R_{e,cl} + 1/(f_{cl}h_e)} \quad (32)$$

La resistencia térmica a la transferencia de calor por evaporación que ejerce la capa de ropa ($R_{e,cl}$, m^2kPa/W) impide la evaporación del vapor de agua existente en la piel y el transporte de vapor de agua de la capa de aislamiento, y en contraposición, a mayor coeficiente de transferencia por evaporación (h_e , W/m^2kPa), mayor será la tasa de evaporación cutánea.

La **relación de Lewis**, permite relacionar el coeficiente convectivo por evaporación con el coeficiente convectivo del aire seco y se expresa como el cociente entre ambos términos. Este coeficiente toma valores próximos a 16,5 K/kPa.

$$LR = h_e/h_c \quad (33)$$

En cuanto a la resistencia térmica por evaporación, también existe una expresión según *ASHRAE Fundamentals 2017*, que relaciona los flujos de calor sensibles con los evaporativos de la siguiente forma:

$$i_{cl}LR = \frac{R_{cl}}{R_{e,cl}} \quad (34)$$

Donde i_{cl} es la eficiencia de impregnación de vapor, es decir, la relación entre la capacidad real del flujo de calor por evaporación a través de la ropa y la capacidad del flujo de calor sensible en comparación con la relación de Lewis. (Tabla 5)

La pérdida de calor por evaporación del sudor depende de la cantidad de sudor en la piel y se establece entre dos valores: un valor mínimo que fija la difusión del agua por las capas más externas de las epidermis de forma natural (E_{dif}) y un valor máximo (E_{max}) que se produce al estar la totalidad del cuerpo cubierto por sudor ($w=1$).

Descripción de la vestimenta	i_{cl}
Pantalones cortos, camisa de manga corta	0,34
Pantalones, camisa de manga corta	0,36
Pantalones, camisa de manga larga	0,41
Igual que el anterior + chaleco y camiseta	0,32
Pantalones deportivos, sudadera	0,41
Pijama de manga larga, pijama largo de pantalones, bata de manga 3/4 y pantuflas	0,37
Igual que el anterior, pero en lugar de suéter, chaqueta de traje	0,35
Mono, camisa de manga larga, camiseta	0,35
Mono, de manga larga, ropa interior térmica, ropa interior larga	0,35

Tabla 5. Eficiencia de impregnación de vapor para diferentes niveles de vestimenta [1]

A la evaporación natural del agua a través de la piel, se le suma la componente termorreguladora (E_{rsw}). Por tanto, la combinación de ambas será la tasa de evaporación total del vapor de agua desde la piel (E_{sk}).

$$E_{sk} = E_{rsw} + E_{dif} \quad (35)$$

La pérdida por evaporación termorreguladora, en W/m^2 , es directamente proporcional a la velocidad a la que se genera el sudor regulatorio (tasa de generación regulatoria, \dot{m}_{rsw} en kg/m^2s). El aporte de energía necesario para que dicha cantidad de sudor se evapore, se conoce como el calor de vaporización del agua, cuyo valor se conoce aproximadamente y es de $2,43 \cdot 10^6$ J/kg.

$$E_{rsw} = \dot{m}_{rsw} \cdot h_{fg} \quad (36)$$

En condiciones normales, la pérdida de calor por difusión, en ausencia de sudoración, es proporcional a la sudoración máxima, siendo un porcentaje de esta. El cociente entre ambas se puede entender como un índice que expresa la humedad de la piel (w_{dif}) de manera adimensional, y toma un valor de 0,06. Por tanto, la pérdida por difusión supone un 6% de la sudoración máxima. Para valores de E_{max} elevados o para un largo tiempo de exposición a un ambiente con humedad baja, este índice se puede ver reducido hasta valores cercanos a 0,02, ya que la deshidratación de las capas externas de la piel impide la correcta difusión.

$$\frac{E_{dif}}{E_{max}} = 0,06 \quad \rightarrow \quad E_{dif} = w_{dif} \cdot E_{max} \quad (37)$$

Por otro lado, al cociente entre la componente termorreguladora (E_{rsw}) y la sudoración máxima, se entiende como la parte del cuerpo, o porcentaje del área total del cuerpo, que se debería humedecer para evaporar el sudor regulador (w_{rsw}).

$$E_{rsw} = w_{rsw} \cdot E_{max} \quad (38)$$

Teniendo en cuenta ambos efectos, las pérdidas por difusión, contando con la componente termorregulación, se verán disminuidas, ya que solo tendrá efecto en las zonas del cuerpo que no están cubiertas por sudor, es decir, por $(1-w_{rsw})$, ya que ambos fenómenos no pueden producirse en la misma superficie.

$$E_{dif} = (1 - w_{rsw}) \cdot 0,06 \cdot E_{max} \quad (39)$$

Las pérdidas totales de calor por evaporación del sudor, es decir, haciendo el sumatorio de ambas componentes se concluye que:

$$\begin{aligned} E_{sk} &= (1 - w_{rsw}) \cdot 0,06 \cdot E_{max} + w_{rsw} \cdot E_{max} \\ &= 0,06 \cdot E_{max} + 0,94 \cdot w_{rsw} \cdot E_{max} = (0,06 + 0,94 \cdot w_{rsw}) \cdot E_{max} \end{aligned} \quad (40)$$

Por tanto, de forma análoga a los cálculos realizados para cada componente de las pérdidas por sudoración, para la componente total, la humedad de la piel será el coeficiente que multiplica a la sudoración máxima.

$$w = \frac{E_{sk}}{E_{max}} = (0,06 + 0,94 \cdot w_{rsw}) \quad (41)$$

El valor de la humedad de la piel (% del cuerpo que debe estar cubierto de sudor para conseguir dicha evaporación) toma valores entre 0 y 1. Teóricamente el máximo es el valor de la unidad, sin embargo, no se tienen evidencias de que pueda llegar a ese valor, puesto que no todo el cuerpo puede estar cubierto de sudor en un mismo instante de tiempo. Valores más aceptables, tal y como se comenta en la bibliografía, es como máximo 0,8.

4.2 Índices de confort

En los años 30, se comenzó a investigar acerca de la interacción del ser humano con el ambiente térmico que les rodeaba. Fue años después cuando el arquitecto bioclimático *Baruch Givoni (1963)* desarrolló un índice de estrés térmico, o cuando *Povl Ole Fanger* introdujo lo que se conoce como Voto Medio Previsto o Predicted Mean Vote (1970). Posteriormente, basándose en nuevos estudios y conocimientos afianzados sobre el intercambio que se produce y las consecuencias que conlleva, se fueron introduciendo nuevos índices de confort, cada cual apto para unas ciertas situaciones concretas.

La aparición de los índices de confort “nace” como consecuencia de la aplicación de técnicas de acondicionamiento de aire, con el fin de demostrar que las personas se sienten incómodas ante unas condiciones determinadas, y con ello justificar la implantación de este tipo de sistemas para la mejora de su adaptación.

Es insuficiente justificar una sensación de confort únicamente con la existencia de un equilibrio térmico en el balance energético expuesto con anterioridad. Además de cumplirse dicho balance, es necesario que la temperatura de la piel y la tasa de sudoración estén comprendidas entre ciertos valores.

Según *David Pearlmutter et al. 2016, [5]*, se pueden diferenciar tres categorías de elementos que evalúan el confort térmico: los índices térmicos, los índices empíricos y los índices basados en ecuaciones lineales. Todos y cada uno de ellos establecen ciertos rangos de valores que califican la afección del clima, ya sea polar, frío, templado, árido o tropical, en el confort de las personas, en base a una escala de sensación térmica en la que se diferencian 11 estados.

En este caso, este estudio se va a centrar en los índices térmicos, puesto que son aquellos que están basados en el balance energético realizado sobre el ser humano, teniendo en cuenta todas las variables tanto físicas (temperatura del aire, velocidad del aire, humedad relativa y temperatura radiante media) como personales (nivel de arropamiento y nivel de actividad).

Los índices que pertenecen a esta familia son: la carga térmica (Q), el índice de estrés térmico (ITS), la temperatura fisiológica equivalente (Physiological Effective Temperature, PET), el MENEX Model, la temperatura efectiva universal (Universal Effective Temperature, ETU), la temperatura percibida (PT), la nueva temperatura estándar y temperatura efectiva exterior (New Standard Effective Temperature, SET* and Outdoor Effective Temperature, OUT_SET*), y el índice de clima térmico universal (Universal Thermal Climate Index, UTCI). [5]

+5	Sweltering (S)	Sofocante
+4	Very Hot (VH)	Muy caliente
+3	Hot (H)	Caliente
+2	Warm (W)	Cálido
+1	Slightly Warm (SW)	Ligeramente cálido
0	Comfortable (Cm)	Confortable
-1	Slightly Cool (SC)	Ligeramente fresco
-2	Cool (C)	Fresco
-3	Cold (Co)	Frío
-4	Very Cold (VC)	Mucho frío
-5	Extremely Cold (EC)	Extremadamente frío

Tabla 6. Escala de sensación térmica general [5]

A continuación, el desarrollo de este documento se va a centrar en los tres primeros (carga térmica, índice de estrés térmico y PET) ya que, gran parte de los demás, son más adecuados para confort interior, a pesar de que se puedan adaptar para confort en exteriores, ante condiciones climáticas estables, o al menos condiciones climáticas controlables mecánicamente. Sin embargo, el control climático exterior está más influenciado por la variabilidad de los parámetros, que perjudican la capacidad de adaptación de las personas. (*Urban Climate 18, 2016, [14]*)

4.2.1 Carga térmica (Q)

Este índice de confort se define como el calor que hay que extraer o suministrar al cuerpo para que esté en confort. Se trata de la diferencia entre la producción de calor interno y las pérdidas de calor mediante los mecanismos comentados en este mismo documento, para una persona que se encuentra hipotéticamente en confort, es decir, con una temperatura de la piel y una sudoración dentro de unos valores aceptables. Para ello es necesario en primer lugar determinar para unas condiciones dadas, cual serían dichos valores de dichas variables de la siguiente forma (*Rohles and Nevins (1971) [1]*):

$$T_{sk,req} = 35,7 - 0,0275(M - W) \quad (42)$$

$$E_{rsw,req} = 0,42(M - W - 58,15) \quad (43)$$

Una vez conocidas estas condiciones de confort, la carga térmica (W/m^2) se podría expresar como:

$$Q = M - W - q_{res} - ((C + R)_{confort} + E_{sk,confort}) \quad (44)$$

Donde M , W y q_{res} son los valores de las componentes del balance calculados con las condiciones reales, es decir, las calculadas anteriormente en el desarrollo del modelo de confort.

En el caso de la sudoración, su valor en condiciones de confort se corresponde con la componente termorreguladora en confort, es decir, $E_{rs,req} = E_{sk,confort}$, siendo la componente de difusión (E_{dif}) nula. Y en el caso de las pérdidas sensibles en confort, se deben calcular nuevamente teniendo en cuenta la nueva temperatura de la piel ($T_{sk,req}$).

$$(C + R)_{confort} = \frac{T_{sk,req} - T_o}{R_{cl} + 1/(f_{cl}h_{cr})} \quad (45)$$

La escala de valoración de este índice se muestra en la siguiente tabla. (Gaitani et al., 2007, [10]).

5	Sweltering (S)	Sofocante	> 150 W/m ²
4	Very Hot (VH)	Muy caliente	
3	Hot (H)	Caliente	50 ÷ 150 W/m ²
2	Warm (W)	Cálido	
1	Slightly Warm (SW)	Ligeramente cálido	
0	Comfortable (Cm)	Confortable	-50 ÷ 50 W/m²
-1	Slightly Cool (SC)	Ligeramente fresco	-150 ÷ -50 W/m ²
-2	Cool (C)	Fresco	
-3	Cold (Co)	Frío	
-4	Very Cold (VC)	Mucho frío	< -150 W/m ²
-5	Extremely Cold (EC)	Extremadamente frío	

Tabla 7. Escala de valoración de la carga térmica [5]

4.2.1.1 Análisis de sensibilidad: carga térmica en caso base

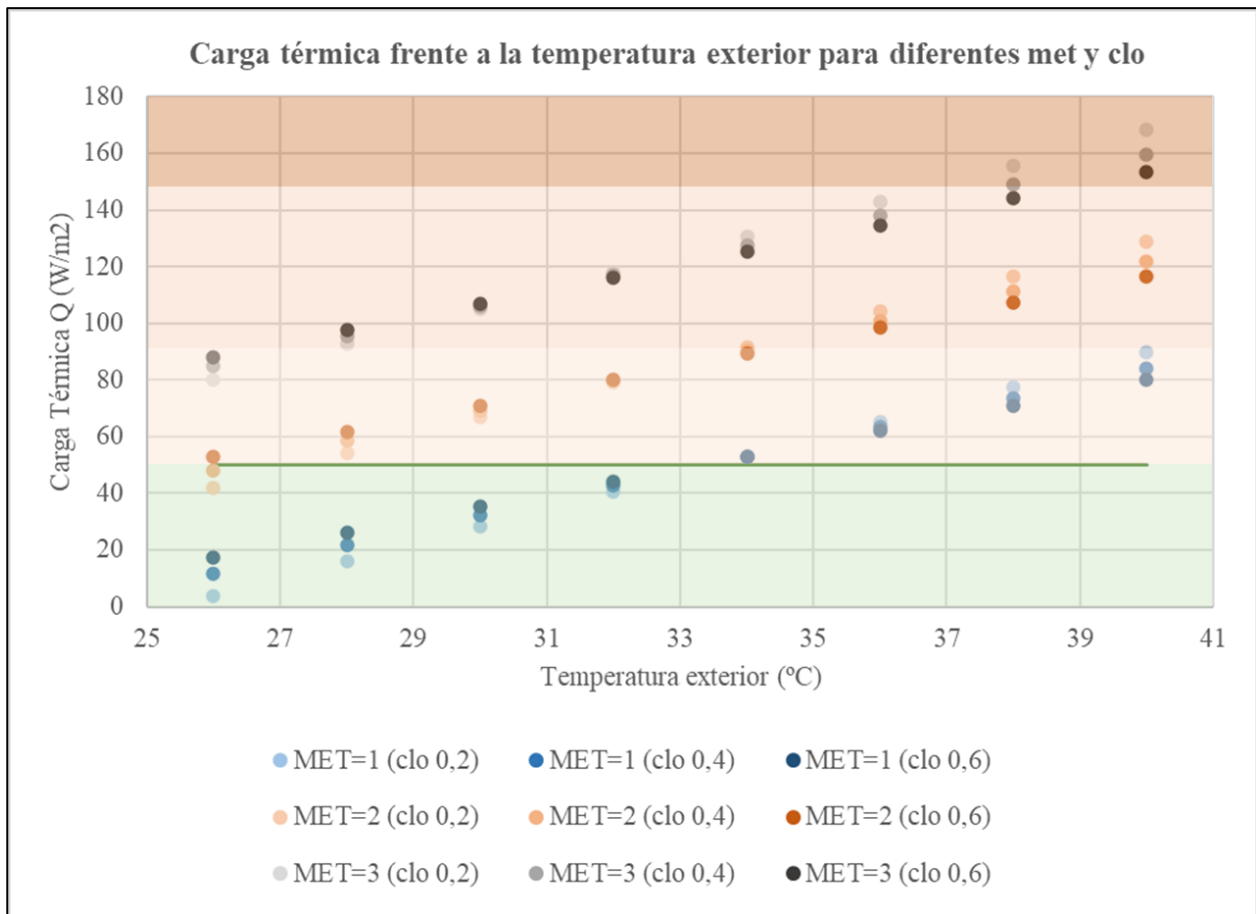


Gráfico 6. Carga térmica frente a la temperatura exterior para diferentes met y clo (caso base)

Tanto la figura anterior como en las dos siguientes representaciones de análisis de sensibilidad de cada índice de confort, se han mostrado los valores correspondientes a met igual a 1 en escala de azules, met igual a 2 en escala de naranjas y met igual a 3 en escala de grises, aumentando su intensidad de color en función del clo.

En este caso se han representado los valores de la carga térmica, detallados en la tabla adjunta en el Anexo I, para diferentes niveles de vestimenta y de actividad. Se han escogido valores de clo [0,2, 0,4, 0,6] ya que son los niveles de vestimenta que se suelen utilizar en épocas cálidas, es decir, pantalones cortos o largos, y camiseta de manga corta. No se valoran otras vestimentas porque implicarían clara y directamente una situación de disconfort ante cualquier situación.

Como se ha comentado con anterioridad en la escala de valoración, este indicador muestra condiciones de confort cuando su valor es inferior a 50 W/m². Esto solo ocurre para un nivel de actividad bajo (correspondiéndose con una actividad sedentaria, estando la persona quieta o sentada) y para cualquier niveles de vestimenta, siempre y cuando la temperatura exterior sea inferior a 33 °C. Una vez superada dicha temperatura, se entraría en unas condiciones cálidas.

En el caso de estar realizando otras actividades que impliquen más movimiento y que sean, por lo tanto, actividades más duras, como puede ser al alcanzar un met igual a 2 o 3, se tendrían valores de la carga térmica superior a 50 W/m². Incluso para un met de 3 a una temperatura máxima estudiada de 40 °C, se tendrían unas condiciones sofocantes, superando los 160 W/m².

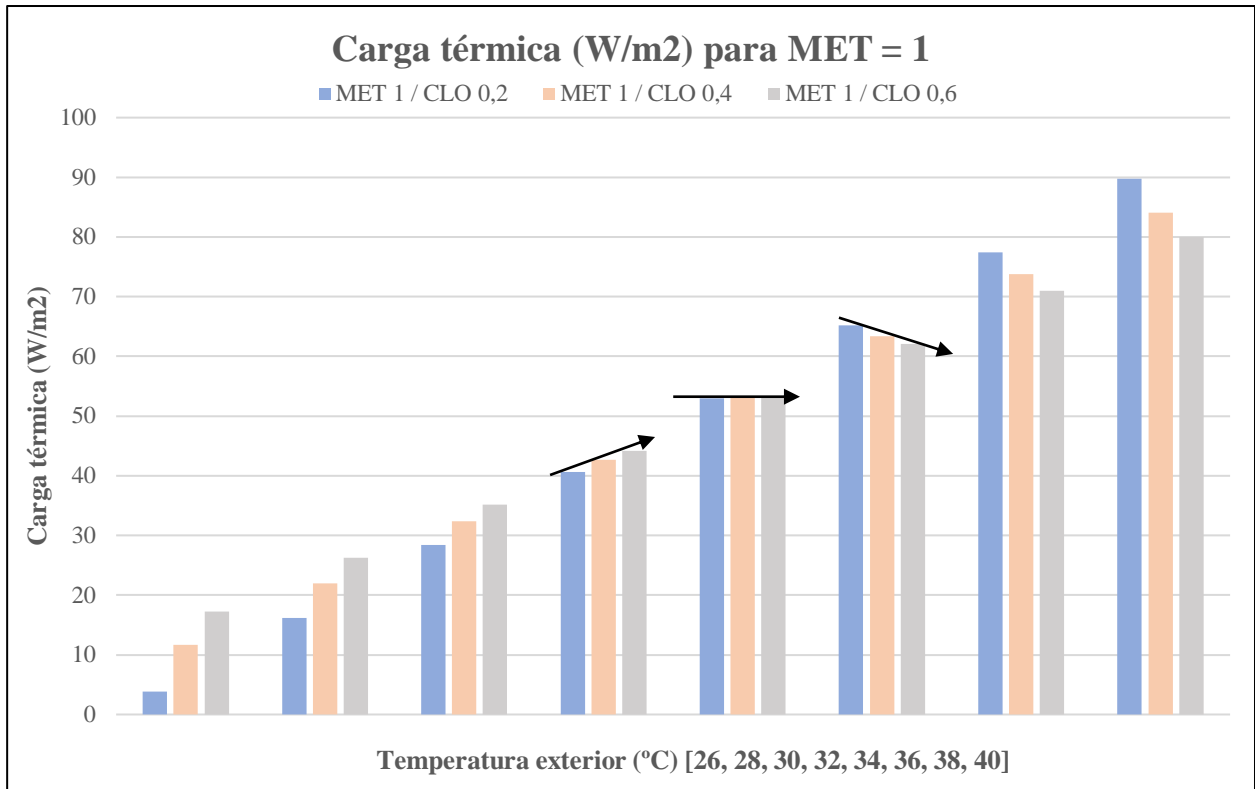


Gráfico 7. Carga térmica para MET=1 y diferentes clo

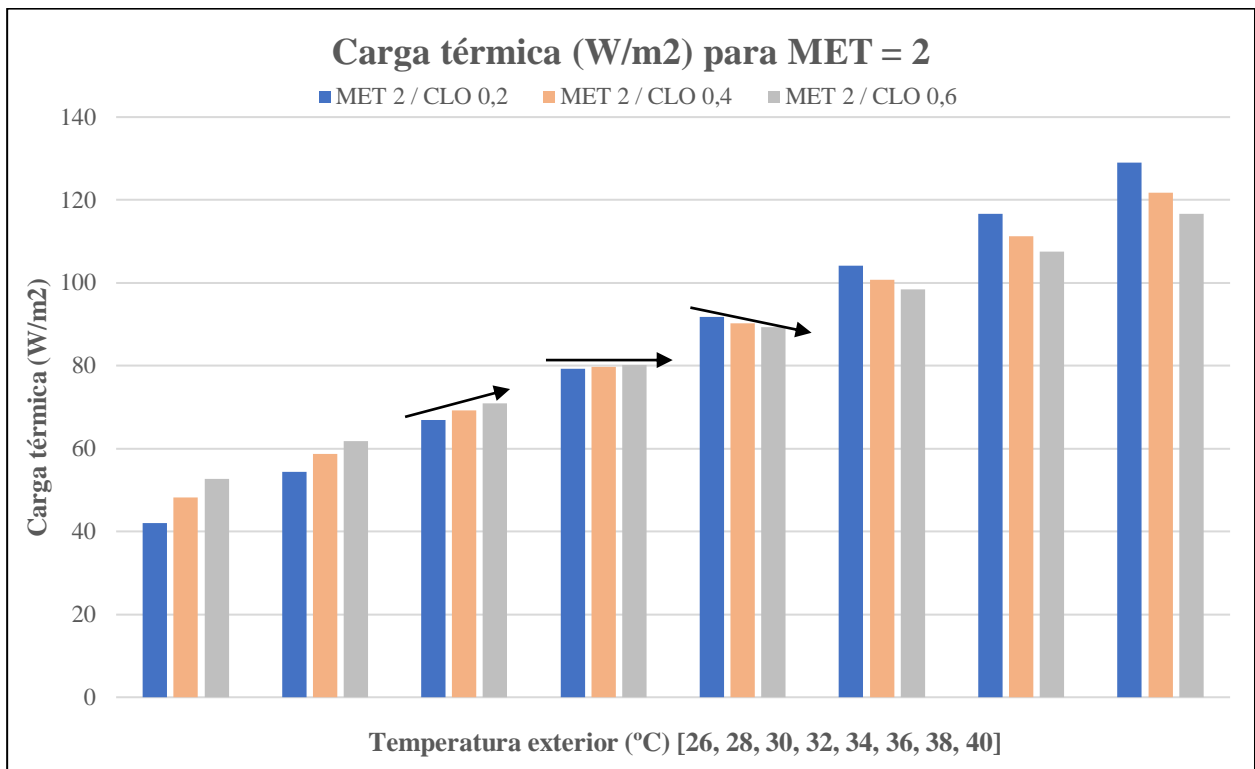


Gráfico 8. Gráfico 7. Carga térmica para MET=2 y diferentes clo

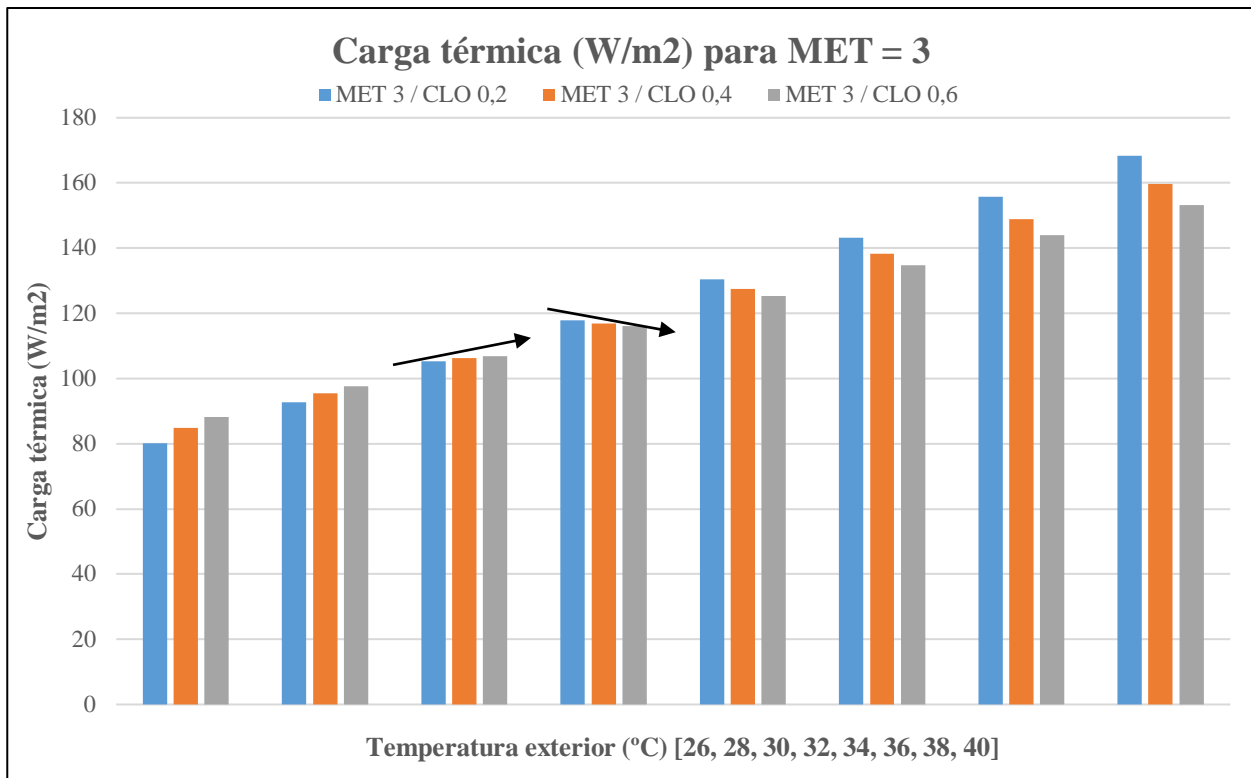


Gráfico 9. Gráfico 7. Carga térmica para MET=3 y diferentes clo

En estos tres gráficos anteriores se han representado los mismos valores que en el gráfico inicial, pero esta vez desglosado para cada nivel de met. Las conclusiones en cuanto al nivel de confort según el valor de la carga térmica, evidentemente son las mismas. Sin embargo, es necesario explicar ciertas cuestiones que surgen de las representaciones y que pueden dar lugar a confusión. Todos los resultados numéricos se encuentran en el *Anexo I*, y serán necesarios para el seguimiento de la siguiente explicación.

En un principio, sería lógico pensar que el valor de la carga térmica aumentaría al estar realizando la misma actividad y por lo tanto tener un met constante, y al aumentar nuestro nivel de vestimenta, pues cuanto más ropa se tenga, más complicado sería en una situación de confort para cualquier condición térmica exterior. Si bien se refleja esta teoría en los tres gráficos para ciertos valores de la temperatura exterior, esto no ocurre en todos los casos.

Se conoce de la formulación del índice de confort (*Ecuación 42*), que la temperatura de la piel en equilibrio o en confort está referida al met únicamente, con lo que ante una variación del clo, no se vería modificada. Por lo que para un met constante, la temperatura de la piel también lo será.

Y por otro lado, las pérdidas de calor sensibles en un estado de confort dependen de la diferencia existente entre la temperatura de la piel en equilibrio y la exterior de manera directa, y de la resistencia térmica de la ropa de manera inversa.

Con esta información se obtienen dos conclusiones:

- En primer lugar, las pérdidas de calor sensibles van disminuyendo conforme aumenta la temperatura exterior, hasta el punto de que la temperatura exterior supera a la propia temperatura de la piel, pasando a ser una absorción de calor exterior (valor negativo), en lugar de expulsar el calor del cuerpo. De esta manera, al absorber más calor, y al ser la carga térmica la cantidad de calor a extraer del cuerpo, este índice evoluciona de manera ascendente para cada condición de clo y met blindada, ante una variación de la temperatura exterior.

- En segundo lugar, a partir de que la temperatura exterior es superior a la de la piel en equilibrio es cuando empieza a no cumplirse el hecho comentado en la teoría planteada inicialmente, pues la diferencia de temperaturas es de valor negativo, y empieza a ser un flujo de calor que absorbe el cuerpo en lugar de cederlo. Añadiéndole el hecho de que al aumentar el clo, y con lo cual dividir entre un número más grande, la **absorción** de calor, aunque no se visualice de manera previa, disminuye.

Con estas dos conclusiones se muestra la explicación de que hasta cierta temperatura exterior, la carga térmica aumente con el clo, pero a partir de ahí, ocurra todo lo contrario.

4.2.2 Índice de estrés térmico (ITS)

El índice de estrés térmico es un parámetro que evalúa la cantidad necesaria de sudor que tiene que segregarse una persona para mantener un equilibrio térmico y la eficiencia de enfriamiento del cuerpo humano (*Urban Climate 18, 2016 [14]*). Fue definido por Givoni (1963) y posteriormente adoptado por Pearlmutter.

Su valor se determina mediante la siguiente ecuación:

$$ITS = E \cdot \frac{1}{f} \quad (46)$$

Donde E es la cantidad de calor segregado expresado en W. Al conocer dicho valor en W/m² referido al área de DuBois, únicamente sería necesario multiplicar por su valor para obtener las unidades deseadas.

$$ITS = E_{sk} \cdot A_{DuBois} \cdot \frac{1}{f} \quad (47)$$

En el último término de la expresión, aparece el concepto de f, que representa la eficiencia de enfriamiento de la sudoración, y es adimensional. Dicha eficiencia se puede expresar como la relación existente entre la tasa de enfriamiento requerida por sudoración y la capacidad máxima de evaporación, es decir, entre E_{sk} y E_{max}, para valores de w superior a 2.15. En caso de estar en el intervalo [0.2, 2.15) la eficiencia será de 3.5, y valores w inferiores a 0.2, la eficiencia será de 1 [5].

$$\frac{1}{f} = 1 \quad \text{para } \frac{E_{sk}}{E_{max}} < 0.2$$

$$\frac{1}{f} = 3.5 \quad \text{para } 0.2 \leq \frac{E_{sk}}{E_{max}} < 2.15$$

$$\frac{1}{f} = \exp \left[0,6 \cdot \left(\frac{E_{sk}}{E_{max}} - 0,12 \right) \right] \quad \text{para } \frac{E_{sk}}{E_{max}} \geq 2.15 \quad (48)$$

La escala de valoración de este índice de confort se muestra en la siguiente tabla. (Pearlmutter et al., 2014, [5]).

+5	Sweltering (S)	Sofocante	> 800 W
+4	Very Hot (VH)	Muy caliente	
+3	Hot (H)	Caliente	480 ÷ 800 W
+2	Warm (W)	Cálido	160 ÷ 480 W
+1	Slightly Warm (SW)	Ligeramente cálido	
0	Comfortable (Cm)	Comfortable	-160 ÷ 160 W
-1	Slightly Cool (SC)	Ligeramente fresco	< -160 W
-2	Cool (C)	Fresco	
-3	Cold (Co)	Frío	
-4	Very Cold (VC)	Mucho frío	
-5	Extremely Cold (EC)	Extremadamente frío	

Tabla 8. Escala de valoración del índice de estrés térmico [5]

El índice de estrés térmico, también se puede evaluar mediante otro índice denominado *sweating rate* que es equivalente al ITS, únicamente modificando las unidades para tener un concepto numérico más práctico.

$$SR = m_{rsw} \cdot \frac{1}{f} \cdot A_{DuBois} \cdot 3600 \cdot 1000 \quad [g/h] \quad (49)$$

Donde, m_{rsw} es la tasa de producción de sudor en kg/ms^2 . Se pueden definir ciertos rangos o valores entorno a los que se puede evaluar el confort. Aproximadamente, una persona con un sweating rate en torno a 30 g/h se podría decir que no se encuentra en disconfort total y que sería capaz de permanecer en su lugar durante un largo periodo de tiempo. Alrededor de 60 g/h la permanencia en ese mismo lugar se vería reducida hasta apenas 1 hora, mientras que valores cercanos a 90 g/h harían imposible estar más de 15 minutos.

4.2.2.1 Análisis de sensibilidad: Índice de estrés térmico en caso base

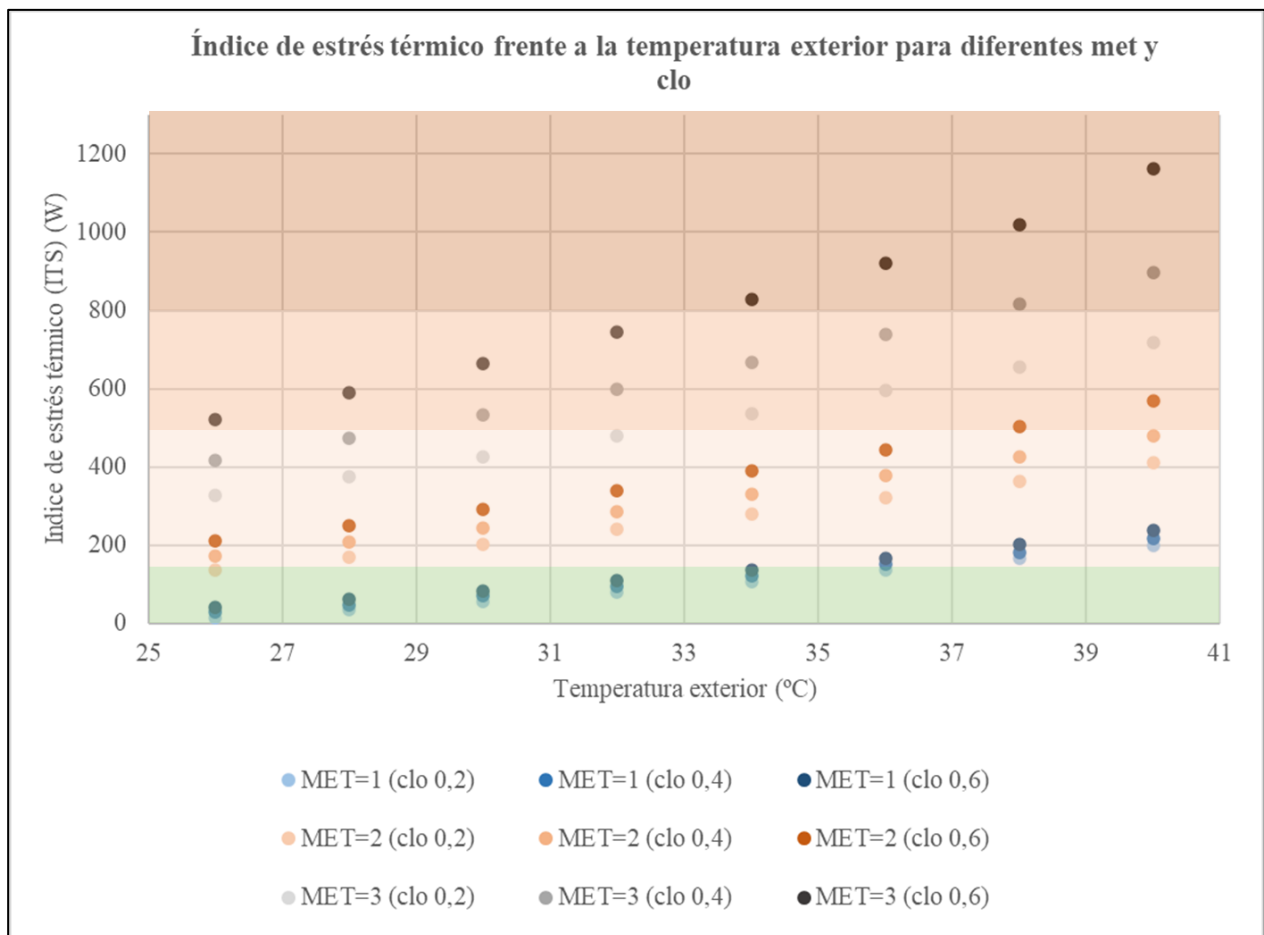


Gráfico 10. Índice de estrés térmico frente a la temperatura exterior para diferentes met y clo

En este caso, mostrando la misma casuística para el índice de estrés térmico, se obtienen unos resultados similares a los del anterior índice de confort, es decir, que ambos indicadores muestran un situación de confort similar y sus escalas de graduación se podría decir que se corresponden con cierta seguridad.

Se evidencia al tener una situación de confort favorable para un nivel de actividad bajo (correspondiéndose con una actividad sedentaria, estando la persona quieta o sentada) y para cualquier niveles de vestimenta, siempre y cuando la temperatura exterior sea inferior a 33 °C. Una vez superada dicha temperatura, se entraría en unas condiciones cálidas.

Para el caso de niveles de actividad superiores, se iría dificultando la permanencia en la estancia durante un tiempo prolongado. Bien es cierto que en el caso de la carga térmica, la diferencia de resultados al aumentar el nivel de vestimenta para cada met, es proporcional, pero en el caso del índice de estrés térmico, no. Conforme aumenta el met, se hace más notable la influencia de un aumento del nivel de vestimenta, notándose en la separación entre las diferentes magnitudes.

A pesar de todo ello, es necesario encontrar una serie de indicadores que muestren una valoración y escala sincronizada, que identifiquen el confort de manera simultánea, y en este caso entre estos dos factores, si ocurre.

4.2.3 PET (Physiological Equivalent Temperature)

El concepto de temperatura fisiológica equivalente fue introducido por Höppe y Mayer en 1987. Se trata de una temperatura del aire exterior a la que se mantiene el equilibrio de calor del cuerpo humano, es decir, se produce la misma respuesta térmica inicial, si se mantiene constante las pérdidas de calor sensible que sufre el cuerpo humano, ante unas condiciones normales de evaluación específicas y diferentes a las del caso base (Peter Höppe, 1999, [9]). Dichas condiciones son las siguientes:

- Temperatura radiante media igual a la temperatura de aire exterior
- Velocidad de aire exterior de 0,1 m/s
- Presión de vapor de agua de 12 hPa (equivalente a que el aire tenga un 50% de humedad relativa)
- Calor metabólico de 80 W, es decir, realizando una actividad ligera (met 1.5)
- Nivel de vestimenta de 0,9 clo (vestimenta de oficina)

La gran ventaja de este índice de confort es que es muy personalizable, ya que no está referida a lugares determinados, sino que se puede emplear para cualquier caso, tanto en interiores como en exteriores, y tiene su escala de valoración para todos y cada uno de los tipos de clima. Es por ello que se trata de uno de los índices térmicos más usados en este ámbito de estudio.

La escala de valoración de este índice de confort se muestra en la siguiente tabla. (Matzarakis et al. 1999, [13]).

+5	Sweltering (S)	Sofocante	> 41 °C
+4	Very Hot (VH)	Muy caliente	
+3	Hot (H)	Caliente	35 ÷ 41 °C
+2	Warm (W)	Cálido	29 ÷ 35 °C
+1	Slightly Warm (SW)	Ligeramente cálido	23 ÷ 29 °C
0	Comfortable (Cm)	Comfortable	18 ÷ 23 °C

-1	Slightly Cool (SC)	Ligeramente fresco	13 ÷ 18 °C
-2	Cool (C)	Fresco	8 ÷ 13 °C
-3	Cold (Co)	Frío	4 ÷ 8 °C
-4	Very Cold (VC)	Mucho frío	< 4 °C
-5	Extremely Cold (EC)	Extremadamente frío	

Tabla 9. Escala de valoración del PET [5]

Tal y como expresa Höpfe en su artículo [9], se fijan ambos valores de vestimenta y actividad para que este índice fuese independiente del comportamiento individualizado de las personas. Sin embargo, no se descarta la variabilidad de estos parámetros, puesto que el efecto que tiene sobre el PET no son demasiado sensibles. A modo de ejemplo, se expone que, bajo un PET de 20°C, una persona con un calor metabólico de 80 W y 0,9 clo, alcanzaría una temperatura de la piel de 33,7°C, mientras que, si se aumenta el nivel de vestimenta hasta los 2 clo, la temperatura de la piel ascendería a los 34,7°C. De esta manera se demuestra cómo, ante un cambio de vestimenta, el que 2 clo implicaría una persona que lleva puesto manga larga con ropa interior térmica, el aumento de la temperatura fisiológica no sería tan acusado.

Para su obtención, únicamente se plantean las mismas ecuaciones que para el modelo de confort inicial, con las nuevas condiciones de contorno, a excepción de la temperatura exterior (y radiante media) o PET, junto con una nueva ecuación más que será la que cierre el balance en la que se fija la invariabilidad de las pérdidas de calor sensible del cuerpo humano.

4.2.3.1 Análisis de sensibilidad: PET en caso base

En el caso del PET, los resultados obtenidos para el caso base difieren en cierta medida de los anteriores. No se cumple la relación entre los valores obtenidos de cada índice, es decir, los resultados del PET son más restrictivos, con lo que a pesar de que en el caso del índice de estrés térmico o de la carga térmica se contaba con una situación de confort en varias ocasiones, en el caso del PET apenas en ciertos casos ocurre.

En función de su escala de valoración, se tienen las siguientes proporciones de evaluaciones, según se puede apreciar en la *Tabla 10*.

- Para un Clo de 0.2:
 - En el 12,5 % de los casos se está en condiciones confortables.
 - En el 25 % de los casos se están en condiciones ligeramente cálidas.
 - En el 25 % de los casos se están en condiciones cálidas.
 - En el 25 % de los casos se están en condiciones calientes.
 - En el 12,5 % de los casos se están en condiciones muy calientes o sofocantes.

- Para un Clo de 0.4:
 - En el 12,5 % de los casos se está en condiciones confortables.
 - En el 25 % de los casos se están en condiciones ligeramente cálidas.
 - En el 25 % de los casos se están en condiciones cálidas.
 - En el 25 % de los casos se están en condiciones calientes.
 - En el 12,5 % de los casos se están en condiciones muy calientes o sofocantes.

- Para un Clo de 0.6:
 - En el 0 % de los casos se está en condiciones confortables.
 - En el 33,33 % de los casos se están en condiciones ligeramente cálidas.
 - En el 29,17 % de los casos se están en condiciones cálidas.
 - En el 29,17 % de los casos se están en condiciones calientes.
 - En el 8,33 % de los casos se están en condiciones muy calientes o sofocantes.

Clo 0,2		Temperatura exterior (°C)							
		26	28	30	32	34	36	38	40
MET	1	20,33	23,53	26,73	29,93	33,13	36,34	39,54	42,74
	2	20,33	23,53	26,73	29,93	33,13	36,34	39,54	42,74
	3	20,33	23,53	26,73	29,93	33,13	36,34	39,54	42,74

Clo 0,4		Temperatura exterior (°C)							
		26	28	30	32	34	36	38	40
MET	1	22,59	25,38	28,17	30,96	33,75	36,54	39,33	42,12
	2	22,35	25,14	27,93	30,72	33,51	36,3	39,09	41,88
	3	22,11	24,9	27,69	30,48	33,27	36,06	38,85	41,64

Clo 0,6		Temperatura exterior (°C)							
		26	28	30	32	34	36	38	40
MET	1	24,23	26,72	29,21	31,7	34,19	36,68	39,18	41,67
	2	23,82	26,31	28,8	31,29	33,78	36,27	38,76	41,25
	3	23,4	25,89	28,38	30,88	33,37	35,86	38,35	40,84

Tabla 10. PET frente a la temperatura exterior para diferentes met y clo

Hora del día	Temperatura media (°C)
7/26/20 0:00	25,33
7/26/20 1:00	23,77
7/26/20 2:00	22,93
7/26/20 3:00	22,23
7/26/20 4:00	22,61
7/26/20 5:00	22,5
7/26/20 6:00	22,22
7/26/20 7:00	23,36
7/26/20 8:00	24,99
7/26/20 9:00	26,3
7/26/20 10:00	27,97
7/26/20 11:00	29,7
7/26/20 12:00	30,94
7/26/20 13:00	31,75
7/26/20 14:00	32,37
7/26/20 15:00	32,88
7/26/20 16:00	33,05
7/26/20 17:00	32,86
7/26/20 18:00	32,04
7/26/20 19:00	30,21
7/26/20 20:00	27,74
7/26/20 21:00	25,55
7/26/20 22:00	24,4
7/26/20 23:00	23,2

Tabla 11. Temperaturas media horaria en verano (Sevilla)

En la *Tabla 11*, se ha añadido la información de la temperatura media horaria de un día de verano en la ciudad de Sevilla (26 de julio) para el año 2021.

De los resultados del análisis de resultados del PET, parece que la única temperatura exterior que hace, para cualquier valor de met y clo, que se esté en condiciones de confort, es para una temperatura de 26°C.

Teniendo en cuenta las temperaturas medias horarias anteriormente comentadas, únicamente se está por debajo de esa temperatura durante las 21:00 h de la noche y las 8:00 h de la mañana. La zona objetivo de estudio, tratándose de un parque de juegos para niños, su tramo horario de uso no se corresponde con las horas más frescas. De hecho, las principales horas de asistencia sería por la tarde, con la desventaja de que las temperaturas exteriores ya son muy superiores a las que harían tener un PET dentro de unos valores controlados. Por lo tanto, para todo el tramo horario de su uso se estaría en unas condiciones desfavorables de confort, requiriendo de actuaciones que mejoren esta situación.

5 ESTRATEGIAS DE ACONDICIONAMIENTO

Los índices de confort, como se mostraba anteriormente en sus respectivos análisis de sensibilidad, están dentro de los límites intolerables de las escalas de valoración. Para mermar dichas condiciones, es necesaria la aplicación de ciertas técnicas de acondicionamiento del espacio abierto.

En función de sobre qué flujo de calor se quiera influir, se aplican unas técnicas u otras.

5.1 Cobertura

En el caso de que se quiera reducir la radiación solar, se debe actuar sobre la radiación directa y difusa que incide, además de la reflejada, obstruyéndola. Las técnicas específicas para su correcta realización, es la incorporación de coberturas e infraestructuras de confinamiento.

Las coberturas son elementos que se colocan entre la radiación solar directa y la zona objeto de estudio. De igual forma, los confinamientos evitan la entrada de radiación solar reflejada en el espacio. La radiación solar es la ganancia más importante y principalmente se debe trabajar sobre esta exposición.

Los tres factores que intervienen en el diseño y dimensionamiento de las coberturas son los siguientes:

- La variabilidad de la posición solar a lo largo de un día y para todos los días del año. Estos factores influyen directamente sobre la cantidad de sombra que se produce, y depende de las dimensiones, forma y distancia entre la cobertura y la superficie a proteger.
- La transmisividad equivalente de la cobertura que representa la fracción de radiación que la cobertura deja pasar a través de la misma de toda la radiación que le llega. Es una característica fundamental de la cobertura y de los materiales de construcción. Este factor cuantificaría la calidad de la obstrucción al paso de los rayos incidentes.
- La calidad de la disipación de la radiación que llega. Cuantifica la cantidad de radiación que es capaz de absorber la cobertura y de la capacidad que tiene para disiparla. Es una característica que depende del tipo de cobertura, de su forma y fundamentalmente de su color.

Los dos últimos factores caracterizan la cobertura, de forma que debe de garantizar que el aislamiento sea de calidad, al no provocar sobrecalentamientos en las superficies por encima de la temperatura exterior y que no provoque un aumento de la temperatura existente en el recinto tratado.

Definitivamente la caracterización de la cobertura es un trabajo con intereses contrapuestos en algunos sentidos. Se debe a que la incorporación de una cobertura con una baja transmisividad permite absorber más radiación y tener mejor calidad de sombras en la superficie. Sin embargo, al absorber mucha radiación lleva asociado un aumento de la temperatura de las superficies de la propia cobertura. Es decir, que en algunos aspectos es favorable y en otros desfavorable, por lo que hay que encontrar una solución de compromiso. Idealmente, la cobertura perfecta sería una cobertura con una absorptividad y transmisividad baja, lo que es difícil de conseguir simultáneamente.

Según la composición de la propia cobertura, se pueden distinguir entre:

- Coberturas simples, formadas por un único material.
- Coberturas dobles, formadas por dos capas de material con una cámara de aire entre ellas.
- Coberturas formadas por lamas, entre las que circula el aire (*Figura 11*)

Y según su material, pueden ser: vegetales, textiles, plásticas, de madera o metálicas. Una buena

cobertura vegetal puede ser una solución idónea porque tienen una absorptividad prácticamente nula, no reflejan la radiación a otros espacios al tener un color oscuro, evacúan el aire caliente de manera que no se generan acumulaciones de calor interno en el recinto, y no se sobrecalientan por encima de la temperatura ambiente exterior.



Figura 10. Techos verdes (coberturas vegetales)



Figura 11. Cobertura formada por lamas

Será un trabajo de optimización el de diseñar una cobertura con los requisitos que se definan, teniendo en cuenta ciertas variables, como puede ser el coste de la estructura, del mantenimiento y su durabilidad de la misma, así como el número de capas, coste del material etc.

5.2 Enfriamiento de las superficies

En el caso de que se quiera reducir o invertir el intercambio radiante de larga longitud de onda, se deben reducir las temperaturas de las superficies circundantes, mediante pavimentos fríos, láminas de agua, riego de coberturas, construcción de superficies verticales de confinamiento que incorporen cascadas o cortinas de agua, o incluso coberturas vegetales, con el fin de reducir su temperatura. Además de mejorar las condiciones de confort de los ocupantes, contribuye de manera directa a la reducción de la temperatura del aire.

Algunos ejemplos de aplicación para el caso de los pavimentos pueden ser:

- De nuevo la vegetación, es decir, la implantación de zonas de césped, que además de absorber gran porcentaje de la radiación sin sobrecalentarse, es capaz de almacenar el agua procedente del riego, reduciendo de manera adicional la temperatura de la superficie.
- Pavimentos fríos, haciendo referencia a pavimentos por los que circula agua muy cerca de la superficie para reducir su temperatura.

Para las coberturas, se pueden emplear mecanismos de refrigeración mediante películas continuas de agua, o mediante sistemas de riego discontinuo.

Y en otras ocasiones, la existencia de una zona de masa de agua, como es el caso de los estanques, contribuyen mucho al acondicionamiento de lugar, ya que absorben gran cantidad de radiación incidente, sin provocar un aumento de la temperatura superficial del agua. Incluso las superficies verticales con cascadas o chorros de agua son más interesantes que las horizontales, ya que el factor de forma con el ocupante es más influyente.



Figura 12. Ejemplo de pavimentos fríos

5.3 Enfriamiento del aire

Por último, en el caso de que se pretenda reducir la temperatura del aire, e inducir a un movimiento de aire tratado, se debe incorporar sistemas de tratamiento de aire, es decir, realizar enfriamientos sensibles o latentes mediante impulsión mecánica. Otro mecanismo sería la incorporación de sistemas de chorros de agua o pulverizadores que disminuyan de forma considerable la temperatura del ambiente.

Como se ha comentado, el enfriamiento puede ser de dos tipos: sensible o latente.

- El enfriamiento sensible trata de reducir únicamente la temperatura del aire sin influir en otros factores adicionales como puede ser la humedad. Se produce al poner el aire en contacto directo con otras superficies más frías. Los mecanismos normalmente empleados para ello es mediante una Unidad de Tratamiento de Aire (UTA) convencional, en la que la fuente fría es agua refrigerada por una unidad enfriadora y la superficie con la cual tiene contacto el aire es una batería de frío. Otra unidad podría ser un sistema de expansión directa, en la que el fluido frío es un refrigerante que intercambia calor con el aire en un evaporador.

Los enfriamientos sensibles son menos viables en acondicionamientos urbanos, ya que se necesita tratar grandes cantidades de aire para mantener una temperatura adecuada en el exterior, lo que conllevaría a un gran consumo de materia refrigerante y grandes consumos de los equipos necesarios para su funcionamiento.

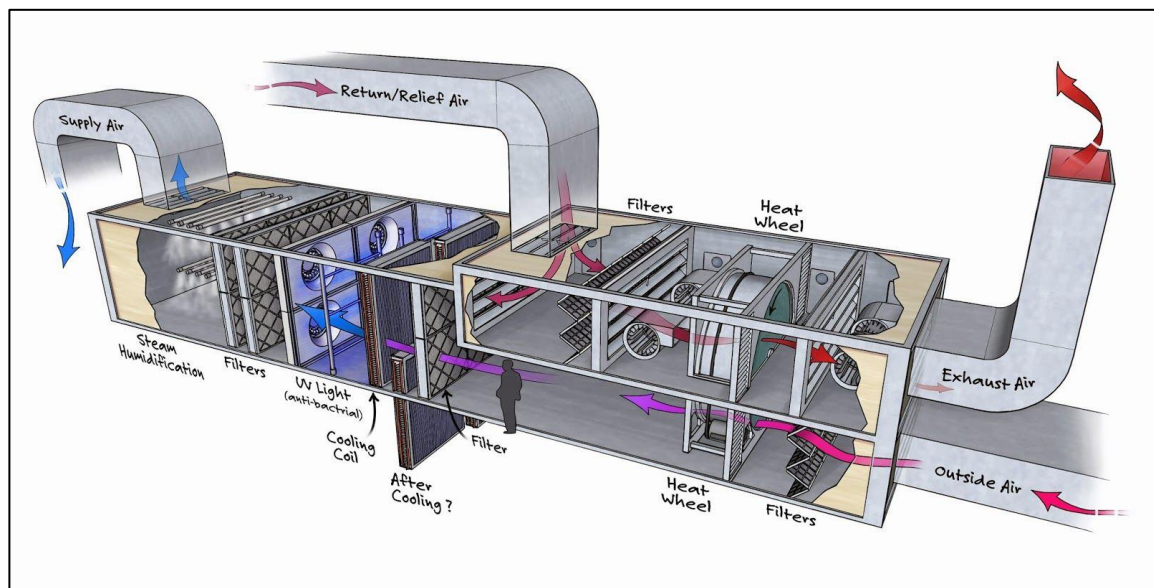


Figura 13. Unidad de Tratamiento de Aire

- El enfriamiento latente, además de reducir la temperatura del aire, también influye sobre la humedad, de ahí que pueda ser denominado también como humidificación adiabática. Se trata de un proceso en el que se ponen en contacto aire y agua, resultando una corriente más fría y más húmeda. El agua absorbe calor del aire, lo necesario para realizar su cambio de fase, de manera que esa agua evaporada, enfría el mismo aire del que procedía la energía necesaria.

Este mecanismo tiene ciertas limitaciones, ya que el aire, cuando alcanza su límite de saturación, no puede absorber más vapor procedente del agua. Es por ello que se consigue un menor enfriamiento del aire, pero sin embargo, con bajos costes al no requerir de ninguna fuente externa o consumos adicionales.

Las técnicas de acondicionamiento latente se centran básicamente en el uso de Unidades de Tratamiento de Aire latentes, o en una segunda opción, micronizadores de gotas, como los que se emplean en las terrazas (*Figura 14*).

En definitiva, son unos sistemas más eficientes en espacios urbanos, con unos costes muy razonables y con unos resultados más que suficientes para alcanzar los objetivos marcados. Lo más adecuado sería una combinación entre ambos, enfriamiento sensible más enfriamiento latente, para sacar el máximo provecho de cada uno de los sistemas.



Figura 14. Ejemplo enfriamiento latente: micronizadores

5.4 Estrategias de acondicionamiento seleccionadas

Para el acondicionamiento de la estancia objeto de estudio, se han seleccionado dos técnicas de acondicionamiento de las anteriormente comentadas. En primer lugar, se estudiará la incorporación de un sistema de acondicionamiento de aire, que permitirá reducir la temperatura del aire exterior hasta unas condiciones más favorables. Y en segundo lugar, se analizará el efecto de una cobertura sobre la radiación directa y difusa que incide sobre el recinto más crítico del lugar. Se establecerá una relación de transmisividades directa-directa, directa-difusa, difusa-difusa de entre 0,2 y 0,3.

Estas técnicas de acondicionamiento, permitirán, como ya se ha comentado, establecer unas condiciones exteriores menos duras y mitigar el problema inicial que sería la permanencia en la zona durante un tiempo extendido en el tiempo. De esta manera, se visualizará su efecto en los propios valores de los índices de confort seleccionados. Posteriormente, se verá una comparativa entre el antes y el después de la aplicación de dichos métodos.

6 MODELIZACIÓN DEL ACONDICIONAMIENTO

6.1 Enfriamiento del aire

Esta técnica de acondicionamiento tratará de mezclar tres corrientes de aire, cada una de ellas en ciertas condiciones, para obtener una temperatura y humedad determinada.

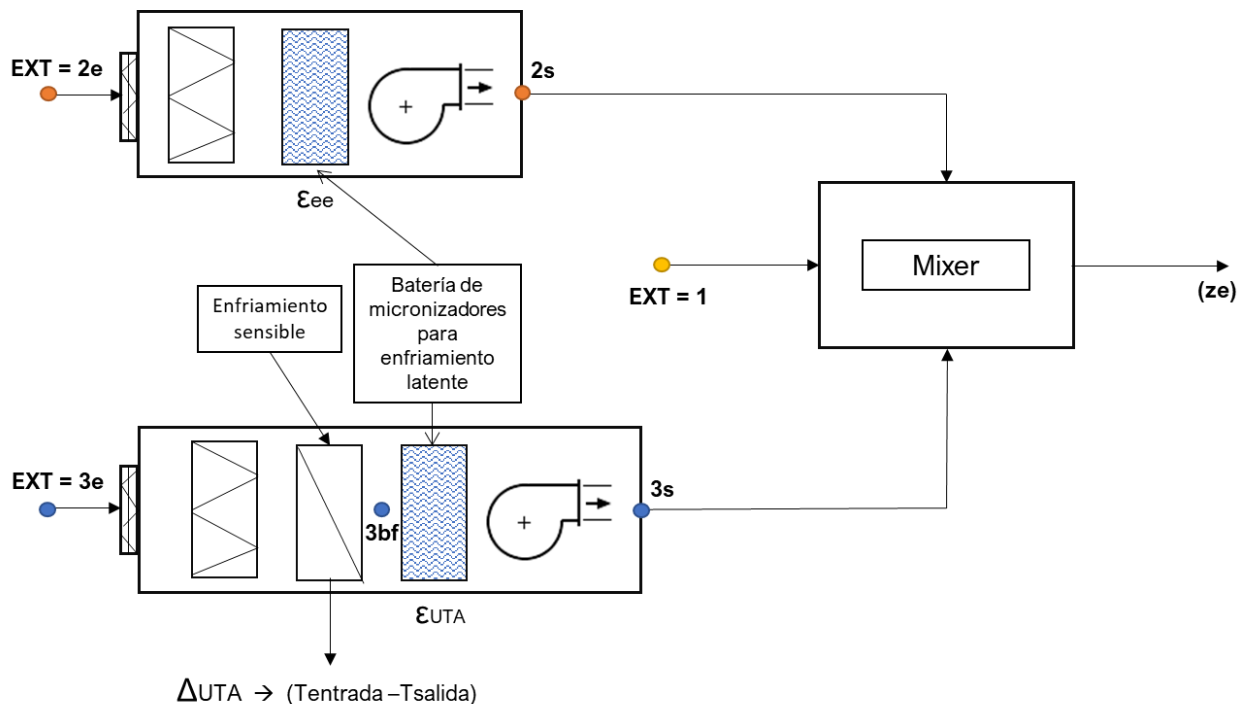


Figura 15. Sistema de acondicionamiento: enfriamiento del aire

- La corriente número 1 será la corriente de aire sin tratar, es decir, la que es tomada directamente del exterior.
- La corriente número 2 será aquella que nace tras un enfriamiento evaporativo del aire exterior. Las condiciones tras el tratamiento dependerán de la eficiencia del enfriamiento evaporativo (ϵ_{ee}). Esta eficiencia será igual a la relación entre la diferencia de temperatura de entrada y salida, y la diferencia entre la temperatura de entrada y la mínima temperatura a la que podría salir, es decir, la temperatura de bulbo húmedo. Se tendrá en cuenta una eficiencia del 75%.

$$\epsilon_{ee} = \frac{T_2^e - T_2^s}{T_2^e - T_2^{bh}} \quad (50)$$

- La corriente número 3 será aquella que surge tras un enfriamiento sensible y otro latente, modificando así tanto su temperatura como su humedad. Para ello habrá que fijar el salto de temperatura en la batería de frío sensible, que será de 15°C, y la eficiencia de la UTA, de forma análoga a la eficiencia anterior. Tomará su mismo valor de 75%.

$$\Delta T_{UTA} = T_3^e - T_3^{BF} \quad (51)$$

$$\varepsilon_{UTA} = \frac{T_3^{BF} - T_3^s}{T_3^{BF} - T_3^{bh}} \quad (52)$$

Donde, T_3^{BF} es la temperatura de salida del enfriamiento sensible (de la batería de frío).

Una vez se conocen las características de cada corriente, se plantea el balance entre ellas con el fin de obtener las condiciones finales de la zona de estancia, es decir, la temperatura y humedad que tendrá el aire que será impulsado al recinto, a la que se le ha denominado (ze).

6.1.1 Balance en el aire

Por un lado se realiza un **balance de temperatura**:

$$Q_{generado} + m_1 \cdot C_p \cdot (T_1 - T_{ze}) + m_2 \cdot C_p \cdot (T_2 - T_{ze}) + m_3 \cdot C_p \cdot (T_3 - T_{ze}) = 0 \quad (53)$$

$$Q_{generado} = 0$$

Despejando la temperatura de la estancia una vez ha sido tratada:

$$T_{ze} = \frac{m_1 \cdot C_p \cdot T_1 + m_2 \cdot C_p \cdot T_2 + m_3 \cdot C_p \cdot T_3}{C_p \cdot (m_1 + m_2 + m_3)} \quad (54)$$

Y por otro lado un **balance de humedad**:

$$W_{generado} + m_1 \cdot (w_1 - w_{ze}) + m_2 \cdot (w_2 - w_{ze}) + m_3 \cdot (w_3 - w_{ze}) = 0 \quad (55)$$

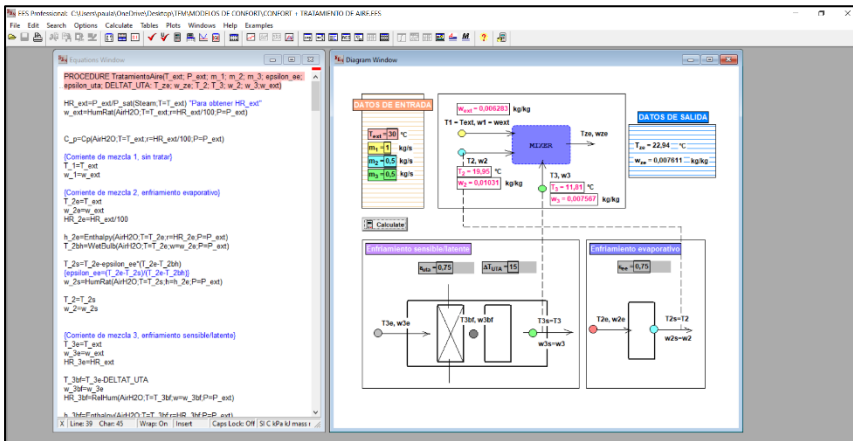
$$W_{generado} = 0$$

Despejando la humedad de la estancia una vez ha sido tratada:

$$w_{ze} = \frac{m_1 \cdot w_1 + m_2 \cdot w_2 + m_3 \cdot w_3}{(m_1 + m_2 + m_3)} \quad (56)$$

Todos y cada uno de los cálculos de propiedades de cada flujo se verán reflejados en los anexos, donde se incluirá todo el código desarrollado de las ecuaciones de cálculo mediante el mapa psicrométrico incorporado en el software. El valor del calor específico del aire se supondrá constante ante la pequeña variabilidad de este factor ante un cambio en las condiciones atmosféricas.

6.1.2 Interfaz tratamiento de aire



La interfaz diseñada para el cálculo de la temperatura de salida tras el tratamiento de aire es la representada en la *Figura 16*, junto con su código que permite un correcto funcionamiento y obtención de resultados de manera intuitiva.

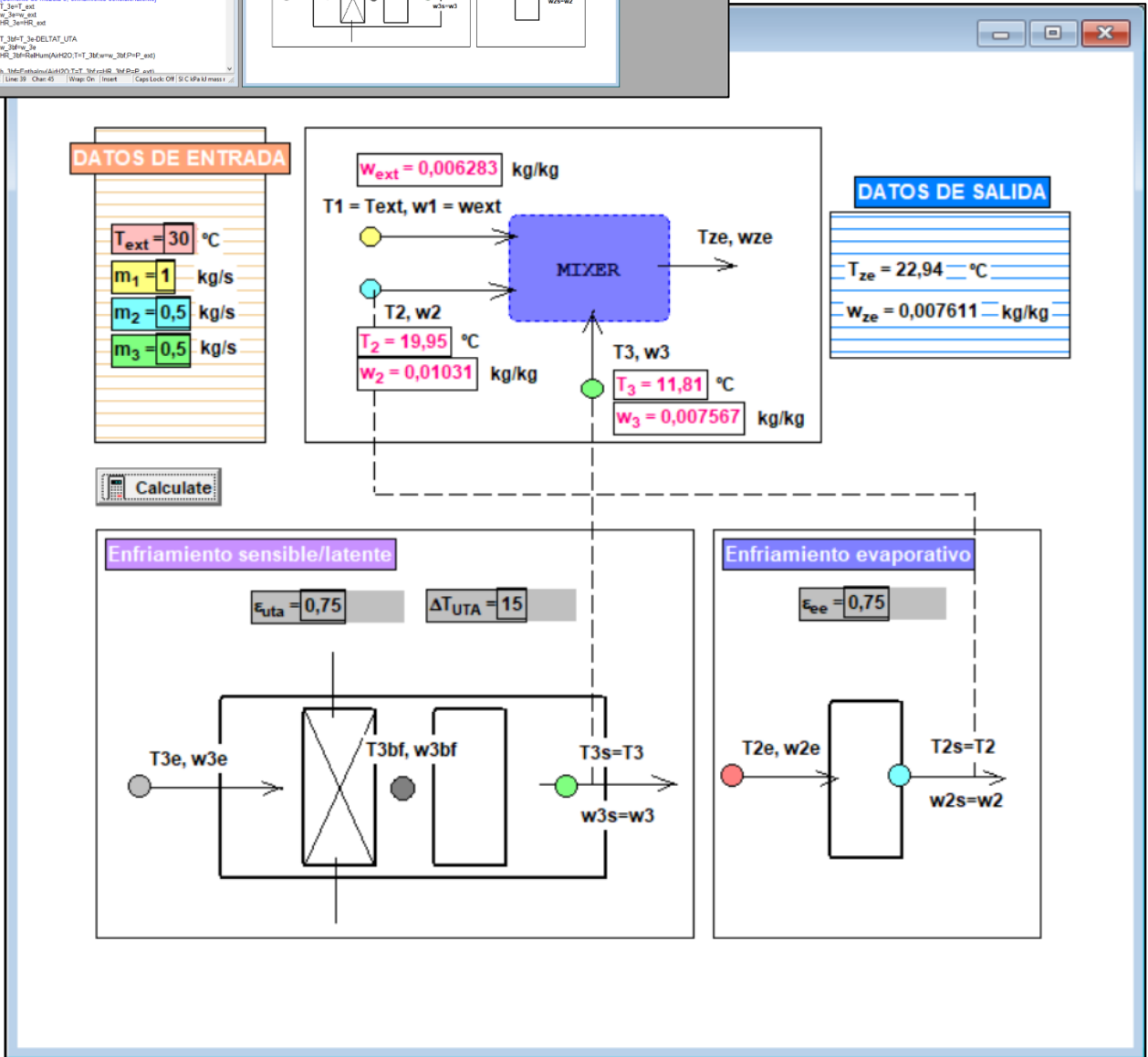


Figura 16. Interfaz tratamiento de aire

Se trata de una interfaz que permite visualizar de manera simplificada el proceso y en la que únicamente hay que insertar los parámetros de entrada requeridos, los cuales son: la temperatura exterior, los caudales de las tres corrientes, las eficiencias de los tratamientos y el salto de temperaturas deseado en la unidad de tratamiento de aire. Con todo ello y dándole al botón de “Calculate”, se obtendrán los valores de temperatura y humedad de la corriente de mezcla (T_{ze}).

6.1.3 Análisis de resultados

A continuación, se muestran ciertos resultados para diferentes temperaturas de entrada (temperatura exterior) y se visualiza cómo, según el tratamiento que se le realice a cada corriente, se tiene un valor de temperatura de salida, mientras que en la columna final se añade la temperatura final de la mezcla para unas corrientes en unas proporciones determinadas, obteniéndose como resultado una temperatura muy inferior a la inicial. Esto permite tener unas condiciones más confortables en el espacio, confirmando la mitigación de las condiciones iniciales del caso base.

[m1, m2, m3] = [1, 0.5, 0.5] kg/s ; ε 0.75 ; ΔT 15 °C			
Text	T2	T3	Tze
24	16,8	8,281	18,27
26	17,86	9,478	19,84
28	18,91	10,65	21,39
30	19,95	11,81	22,94
32	20,97	12,95	24,48
34	21,98	14,07	26,01
36	22,97	15,18	27,54
38	23,96	16,26	29,05
40	24,93	17,33	30,57
42	25,89	18,39	32,07

Tabla 12. Análisis de resultados del tratamiento de aire

El objetivo será concretar y jugar con los valores de los parámetros de entrada, para obtener unas condiciones finales deseadas, es decir, combinar los efectos de la cantidad de caudal de cada corriente, puesto que cuanto más caudal de las corrientes más frías se introduzca, más fría será la temperatura final. Igualmente ocurre con los datos de los equipos, sus eficiencias y el salto de temperatura, pudiendo seleccionar un equipo más eficiente, se pueden obtener los mismos resultados. Por lo que habrá que tomar ciertos valores que optimicen el proceso y que permiten alcanzar el objetivo del tratamiento de aire con cierta seguridad.

6.2 Cobertura

La modelización de la cobertura en el software de cálculo se hace con el objetivo de obtener un valor de la temperatura radiante media más exacta, al tener en cuenta tanto la resistencia que opone la cobertura a la llegada de la radiación solar, en función de sus transmisividades (directa-directa, directa-difusa, difusa-difusa), como los intercambios radiantes entre superficies, en función de sus factores de forma.

En el caso de simulación de la cobertura se van a tener en cuenta las siguientes consideraciones:

- La cobertura será de geometría cuadrangular, de la que se debe fijar sus dimensiones (largo por ancho, en metros).
- Se supone que la geometría de la zona de estancia coincide con la de la cobertura.
- Se supone que el ocupante sobre el que se va a evaluar el confort se encuentra situado en el centro geométrico de la zona de estancia.

- La envolvente se clasificará en cuatro bloques: el cielo, la cobertura, el suelo, y lo que se corresponderá con “otros”, que hará referencia a todo lo demás que rodee al individuo, como pueden ser árboles, de manera que no se pueda definir como una única “superficie”.
- La temperatura de lo que denominamos “otros”, y la temperatura del suelo serán consideradas iguales a la temperatura del aire una vez ha sido tratado.
- Siempre que una superficie vea las otras cuatro que le rodean, el factor de forma con la cobertura y el suelo se calcularán, mientras que los del cielo y “otros” serán:

$$FF_{\text{cielo}} = 0,5 - FF_{\text{cobertura}} \quad \text{y} \quad FF_{\text{otros}} = 0,5 - FF_{\text{suelo}}$$

Mientras que si solo ve dos de ellas, es decir, cobertura + cielo o suelo + otros, serán:

$$FF_{\text{cielo}} = 1 - FF_{\text{cobertura}} \quad \text{y} \quad FF_{\text{otros}} = 1 - FF_{\text{suelo}}$$

- La altura a la que se situará será un detalle muy relevante en la evaluación de la efectividad de la cobertura.

Según la norma ISO 7726:1998, la temperatura radiante media se puede calcular a partir de lo que se denomina “temperaturas radiantes planas (T_{pr})” y los factores de área proyectada para una persona, todas ellas según sus componentes en las seis direcciones.

Dichas seis direcciones hace referencia a cada una de las caras del paralelepípedo que representa al individuo, contabilizando las cuatro caras laterales de iguales dimensiones, y las dos bases (arriba, abajo, derecha, izquierda, delante y detrás).

Las ecuaciones principales que determinan la temperatura radiante media para cada una de las opciones son las siguientes:

- Sentado:

$$T_{rm} = \frac{0,18 \cdot (T_{pr}[up] + T_{pr}[down]) + 0,22 \cdot (T_{pr}[right] + T_{pr}[left]) + 0,3 \cdot (T_{pr}[front] + T_{pr}[back])}{2 \cdot (0,18 + 0,22 + 0,3)} \quad (57)$$

- De pie:

$$T_{rm} = \frac{0,08 \cdot (T_{pr}[up] + T_{pr}[down]) + 0,23 \cdot (T_{pr}[right] + T_{pr}[left]) + 0,35 \cdot (T_{pr}[front] + T_{pr}[back])}{2 \cdot (0,08 + 0,23 + 0,35)} \quad (58)$$

Los factores de área proyectada se definen en función de un parámetro que determina si la persona está sentada o está de pie. A este parámetro lo denominaremos “c”, que tomará un valor de 1 si la persona está de pie y un valor de 0,6 si está sentada. Este parámetro se quiere referir a la altura donde se encuentra el “centro” del individuo.

Los factores de área proyectada hacen referencia a la relación existente entre el área proyectada de una de las caras y el área total. En el caso de una esfera, es en todas las direcciones igual ya que una esfera desde cualquier punto de vista, su área proyectada sigue siendo la misma.

Para cada una de las posiciones y para cada una de las direcciones, se definen los factores mediante la *Tabla 13*.

		Arriba/Abajo	Izquierda/Derecha	Delante/Detrás
De pie	Persona	0,08	0,23	0,35
	Elipsoide	0,08	0,28	0,28
	Esfera	0,25	0,25	0,25
Sentado	Persona	0,18	0,22	0,30
	Elipsoide	0,18	0,22	0,28
	Esfera	0,25	0,25	0,25

Tabla 13. Factores de área proyectada

Ante la imposibilidad de definir la orientación de la persona, se emplea una media entre los factores de área proyectada Derecha/Izquierda y Delante/Detrás, por lo que las ecuaciones anteriores se simplificarían.

- Sentado:

$$T_{rm} = 0,13 \cdot (T_{pr}[up] + T_{pr}[down]) + 0,185 \cdot (T_{pr}[right] + T_{pr}[left] + T_{pr}[front] + T_{pr}[back]) \quad (59)$$

- De pie:

$$T_{rm} = 0,06 \cdot (T_{pr}[up] + T_{pr}[down]) + 0,22 \cdot (T_{pr}[right] + T_{pr}[left] + T_{pr}[front] + T_{pr}[back]) \quad (60)$$

		Arriba/Abajo	Izquierda/Derecha	Delante/Detrás
De pie	Persona	0,06	0,22	0,22
Sentado	Persona	0,13	0,185	0,185

Tabla 14. Factores de área proyectada simplificada

En este caso, los factores de área proyectada deben superar la unidad. Todas las caras laterales tienen el mismo factor al tener las mismas dimensiones, al igual que la base superior e inferior.

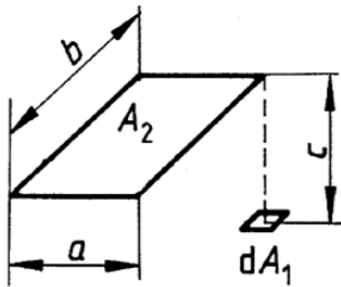
A su vez será necesario calcular las temperaturas radiantes planas en cada dirección. Para ello es necesario conocer: en primer lugar la temperatura superficial de las superficies circundantes (lo que anteriormente hemos denominado cielo, suelo, cobertura y otros), y en segundo lugar, los factores de forma (F_p) entre un pequeño elemento plano y las superficies circundantes, en función de la forma, el tamaño y la posición relativa que existe entre dichas superficies y la persona.

La temperatura radiante plana de cada dirección se calculará de manera ponderada, de manera que incluye la temperatura de las superficies circundantes ponderadas por el factor de forma que constituye con cada una de ellas.

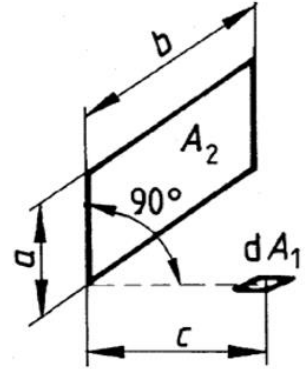
$$T_{pr} = \sum_{i=1}^n T_i \cdot FF_{p-i} = T_1 \cdot FF_{p-1} + T_2 \cdot FF_{p-2} \dots + T_n \cdot FF_{p-n} \quad (61)$$

Según la norma, el cálculo de los factores de forma se clasifican en dos tipos:

Los factores de forma de un elemento diferencial de una superficie plana, y un rectángulo en un plano perpendicular al plano del elemento.



Y los factores de forma de un elemento diferencial de una superficie plana y un rectángulo en un plano paralelo a este, en el que la perpendicular al elemento pasa a través de la esquina del rectángulo.



Los factores de forma de elemento perpendicular a una superficie se calculan como:

$$FF_{perpend} = \frac{1}{2\pi} \left(\tan^{-1} \frac{1}{Y} - \frac{Y}{\sqrt{X^2 + Y^2}} \tan^{-1} \frac{1}{\sqrt{X^2 + Y^2}} \right) \quad (62)$$

Los factores de forma del elemento paralelo a una superficie se calculan como:

$$FF_{paral} = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{X}{\sqrt{1 + X^2}} \tan^{-1} \frac{Y}{\sqrt{1 + X^2}} + \frac{Y}{\sqrt{1 + Y^2}} \tan^{-1} \frac{X}{\sqrt{1 + Y^2}} \right) \quad (63)$$

Donde,

$$X = \frac{a}{b} \quad Y = \frac{c}{b} \text{ (para } FF_{perpend}) \quad e \quad Y = \frac{b}{c} \text{ (para } FF_{paral}) \quad (64) \text{ (65) (66)}$$

Y a y b se corresponden con la mitad de las dimensiones de la cobertura (la mitad de ancho y la mitad del largo respectivamente).

$$a = \frac{\text{Ancho}}{2} \quad b = \frac{\text{Largo}}{2} \quad (67) \text{ (68)}$$

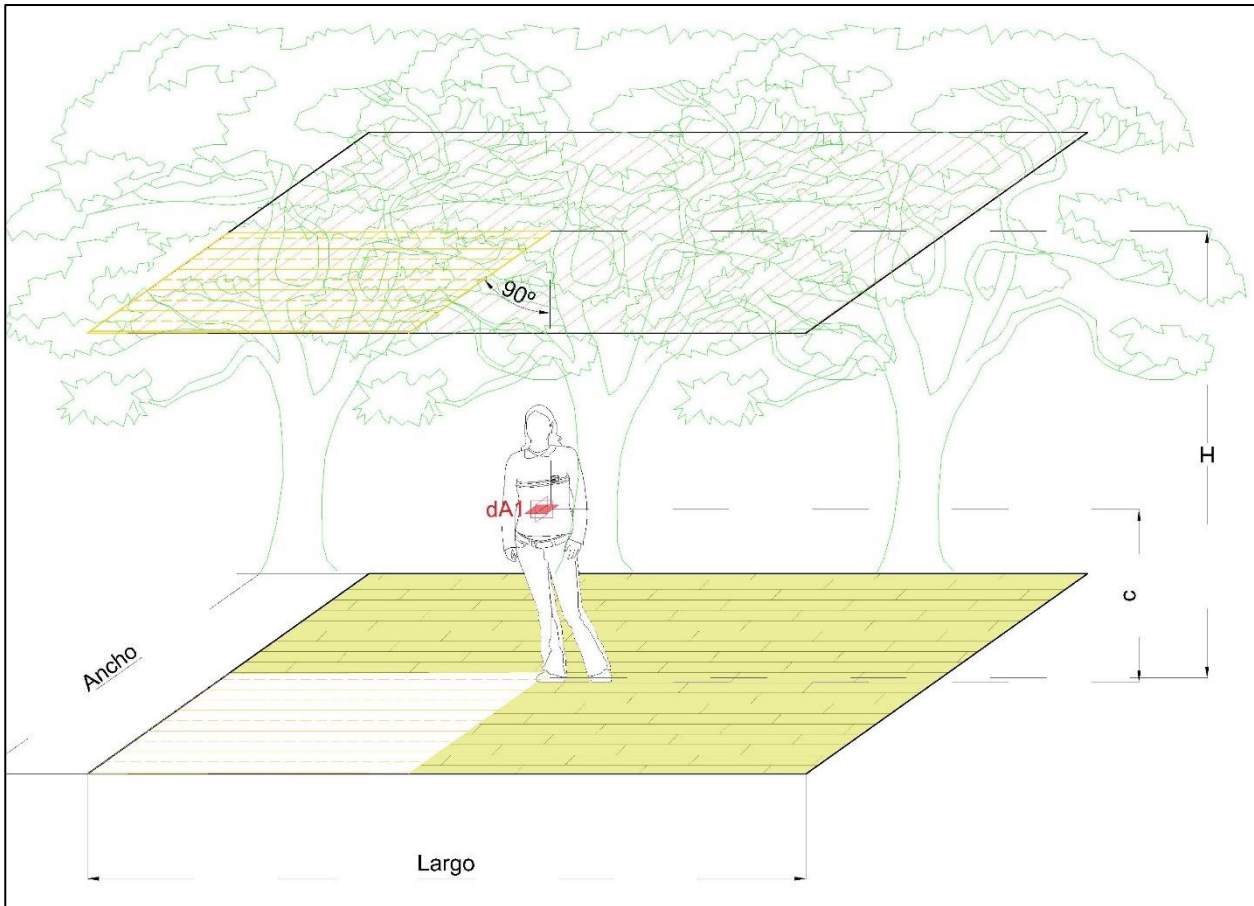


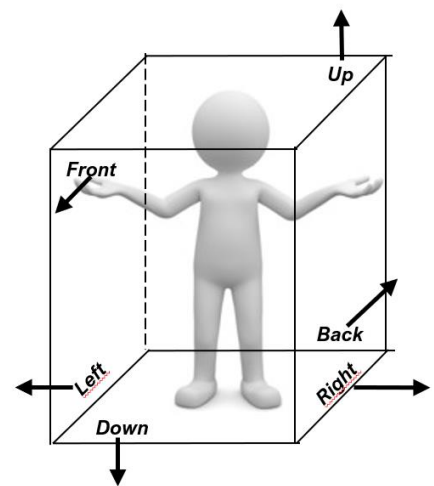
Figura 17. Visualización inicial de la cobertura

Estas expresiones se han aplicado para calcular la temperatura radiante plana en cada dirección. A continuación se detalla el cálculo de cada una de ellas. Tal y como se ve en la *Figura 17*, los elementos diferenciales de superficie de la cara up y down, son paralelos a la superficie del cerramiento, mientras que las caras laterales son perpendiculares. Los valores de X e Y para cada dirección son:

- **Up (Arriba)**

El elemento diferencial en dirección hacia arriba ve únicamente la cobertura y el cielo.

$$X_{up} = \frac{\text{Ancho}/2}{\text{Largo}/2} \quad Y_{up} = \frac{\text{Largo}/2}{H - c}$$



Con estos valores se introducirán dichos valores de X e Y en la fórmula de factor de forma paralelo.

$$FF_{up} = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{X_{up}}{\sqrt{1 + X_{up}^2}} \tan^{-1} \frac{Y_{up}}{\sqrt{X_{up}^2}} + \frac{Y_{up}}{\sqrt{1 + Y_{up}^2}} \tan^{-1} \frac{X_{up}}{\sqrt{1 + Y_{up}^2}} \right)$$

- **Down (Abajo)**

El elemento diferencial en dirección hacia abajo ve únicamente el suelo y la parte proporcional de c con respecto a la altura total H de la superficie de “otros”.

$$X_{down} = \frac{Ancho/2}{Largo/2} \quad Y_{up} = \frac{Largo/2}{c}$$

Con estos valores se introducirán dichos valores de X e Y en la fórmula de factor de forma paralelo.

$$FF_{down} = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{X_{down}}{\sqrt{1 + X_{down}^2}} \tan^{-1} \frac{Y_{down}}{\sqrt{X_{down}^2}} + \frac{Y_{down}}{\sqrt{1 + Y_{down}^2}} \tan^{-1} \frac{X_{down}}{\sqrt{1 + Y_{down}^2}} \right)$$

- **Right (Derecha)**

El elemento diferencial en dirección hacia la derecha ve: parte de la cobertura, parte de cielo, parte del suelo y parte de “otros”. Para esta superficie habría que calcular dos factores de forma perpendiculares, tanto con la cobertura como con el suelo. El coeficiente X se mantiene al tener las mismas dimensiones, pero el coeficiente Y varía al diferir en la distancia perpendicular entre el elemento diferencial y la superficie en cuestión (en un caso sería c y en otra la resultante entre la altura total y c)

$$X_{right} = \frac{Ancho/2}{Largo/2} \quad Y_{right} = \frac{c}{Largo/2} \quad (\text{Para el FF con el suelo})$$

$$X_{right2} = \frac{Ancho/2}{Largo/2} \quad Y_{right2} = \frac{H - c}{Largo/2} \quad (\text{Para el FF con la cobertura})$$

Con estos valores se introducirán dichos valores de X e Y en la fórmula de factor de forma perpendicular.

$$FF_{right-suelo} = \frac{1}{2\pi} \left(\tan^{-1} \frac{1}{Y_{right}} - \frac{Y_{right}}{\sqrt{X_{right}^2 + Y_{right}^2}} \tan^{-1} \frac{1}{\sqrt{X_{right}^2 + Y_{right}^2}} \right)$$

$$FF_{right-cob} = \frac{1}{2\pi} \left(\tan^{-1} \frac{1}{Y_{right2}} - \frac{Y_{right2}}{\sqrt{X_{right2}^2 + Y_{right2}^2}} \tan^{-1} \frac{1}{\sqrt{X_{right2}^2 + Y_{right2}^2}} \right)$$

- Para el resto de direcciones no será necesario calcular los factores de forma, puesto que serían los mismos. Realmente, todas las temperaturas radiantes planas de las direcciones right, left, front y back serían la misma, por lo que con calcular una sería suficiente.

Una vez obtenidos los factores de forma, se calculan las temperaturas radiantes planas de cada dirección:

- **Temperatura radiante plana: Up (Arriba)**

Con se ha explicado anteriormente, el factor de forma del elemento diferencial de la superficie up, se ha calculado con respecto a un trozo de la cobertura, de dimensiones Largo/2 y Ancho/2, es decir, con un cuarto de la cobertura. De esta forma, el factor de forma real, será este unitario multiplicado por 4.

Como se ven dos tipos de “superficies”, en la ecuación habrá dos términos: el correspondiente a la cobertura, el correspondiente al cielo. Haciendo referencia a las fórmulas comentadas en las consideraciones iniciales, se podrían definir los factores de forma del cielo y de “otros” como:

$$FF_{cielo} = 1 - FF_{cobertura} = 1 - 4 \cdot FF_{up} \quad (69)$$

Finalmente, la temperatura radiante plana de la cara de arriba será:

$$T_{up} = 4 \cdot FF_{up} \cdot T_{cob} + FF_{cielo} \cdot T_{cielo} = 4 \cdot FF_{up} \cdot T_{cob} + (1 - 4 \cdot FF_{up}) \cdot T_{cielo} \quad (70)$$

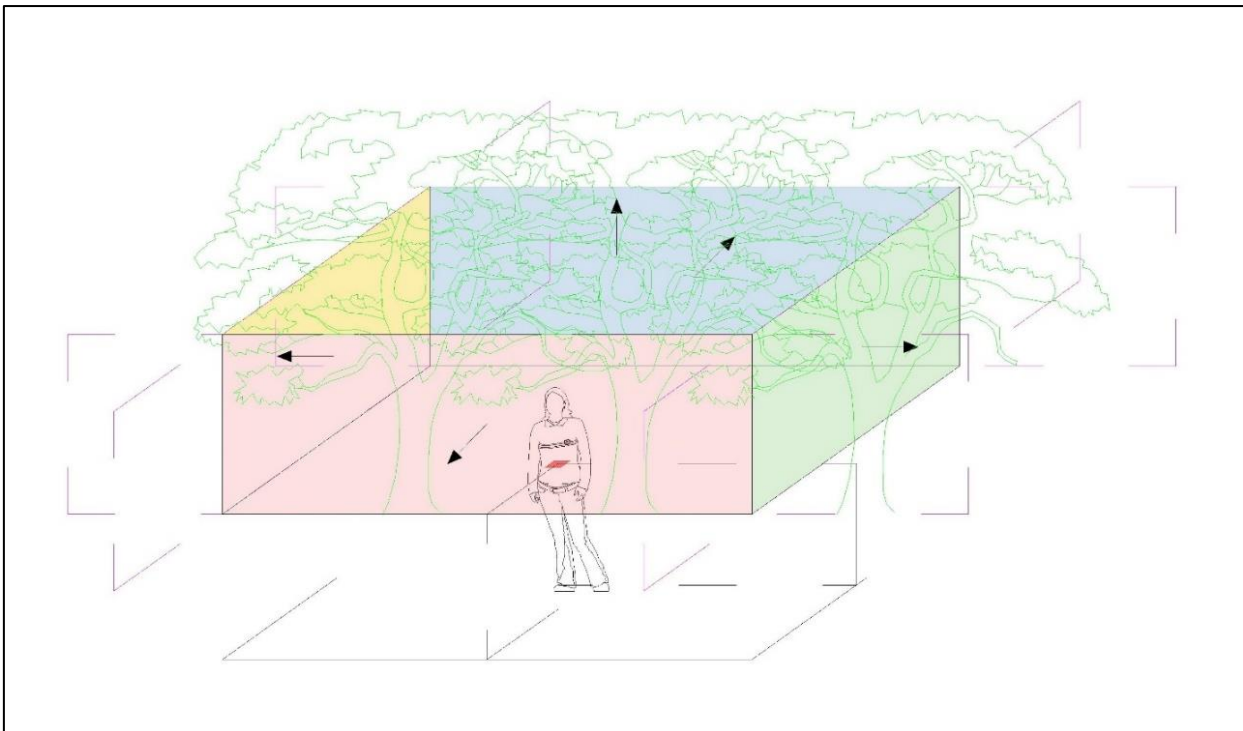


Figura 18. Visualización de superficies para el cálculo de Tup

- **Temperatura radiante plana: Down (Abajo)**

De la misma forma que la cara up, el factor de forma con el suelo se ha calculado respecto a un trozo del mismo, por lo que el factor de forma real será el unitario multiplicado por 4.

En este caso, el suelo ve dos superficies: el suelo y “otros”, por lo que la ecuación tendrá dos términos. La parte correspondiente a la superficie “otros”, será la parte restante a la del suelo.

$$T_{down} = 4 \cdot FF_{down} \cdot T_{suelo} + FF_{otros} \cdot T_{otros} = 4 \cdot FF_{down} \cdot T_{suelo} + (1 - 4 \cdot FF_{down}) \cdot T_{otros} \quad (71)$$

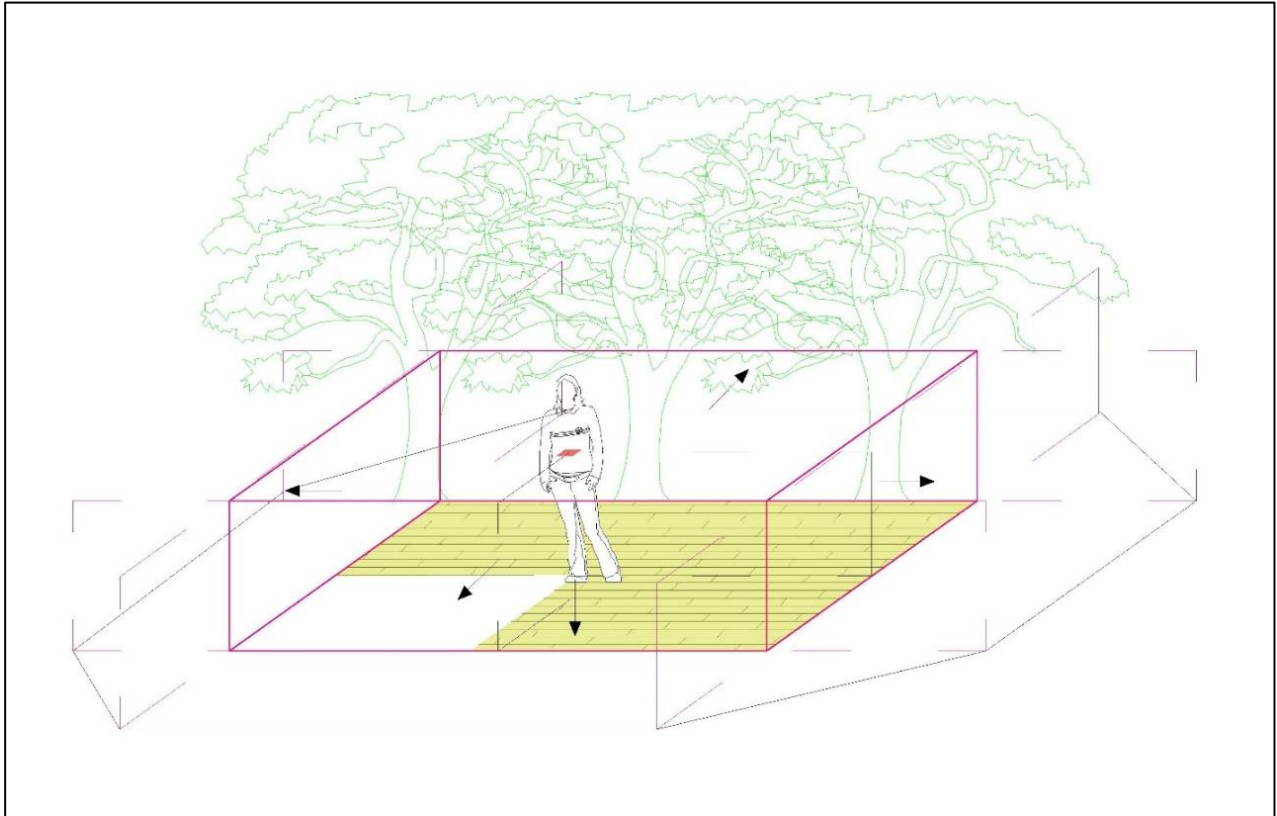


Figura 19. Visualización de superficies para el cálculo de Tdown

- **Temperatura radiante plana: RIGHT (Derecha)**

El factor de forma del elemento diferencial de la superficie right, tanto para con la cobertura como con el suelo, se ha calculado con respecto a un trozo de la cobertura, de dimensiones Largo/2 y Ancho/2, es decir, con un cuarto de la cobertura. De esta forma, el factor de forma real, será este unitario multiplicado, esta vez, por 2, ya que únicamente ve la mitad de la cobertura/suelo.

En este caso, los elementos diferenciales ven todas y cada una de las cuatro superficies, aunque no en su totalidad, por lo que habrá de nuevo que ponderarlas. Haciendo referencia a las fórmulas comentadas en las consideraciones iniciales, se podrían definir los factores de forma del cielo y de “otros” como:

$$FF_{cielo} = 0,5 - FF_{cobertura} = 0,5 - 2 \cdot FF_{right-cob} \quad (72)$$

$$FF_{otros} = 0,5 - FF_{suelo} = 0,5 - 2 \cdot FF_{right-suelo} \quad (73)$$

Finalmente, la temperatura radiante plana de la cara de la derecha será:

$$T_{right} = 2 \cdot FF_{right-suelo} \cdot T_{suelo} + 2 \cdot FF_{right-cob} \cdot T_{cob} + FF_{cielo} \cdot T_{cielo} + FF_{otros} \cdot T_{otros} \quad (74)$$

$$= 2 \cdot FF_{right-suelo} \cdot T_{suelo} + 2 \cdot FF_{right-cob} \cdot T_{cob} + (0,5 - 2 \cdot FF_{right-cob}) \cdot T_{cielo} + (0,5 - 2 \cdot FF_{right-suelo}) \cdot T_{otros}$$

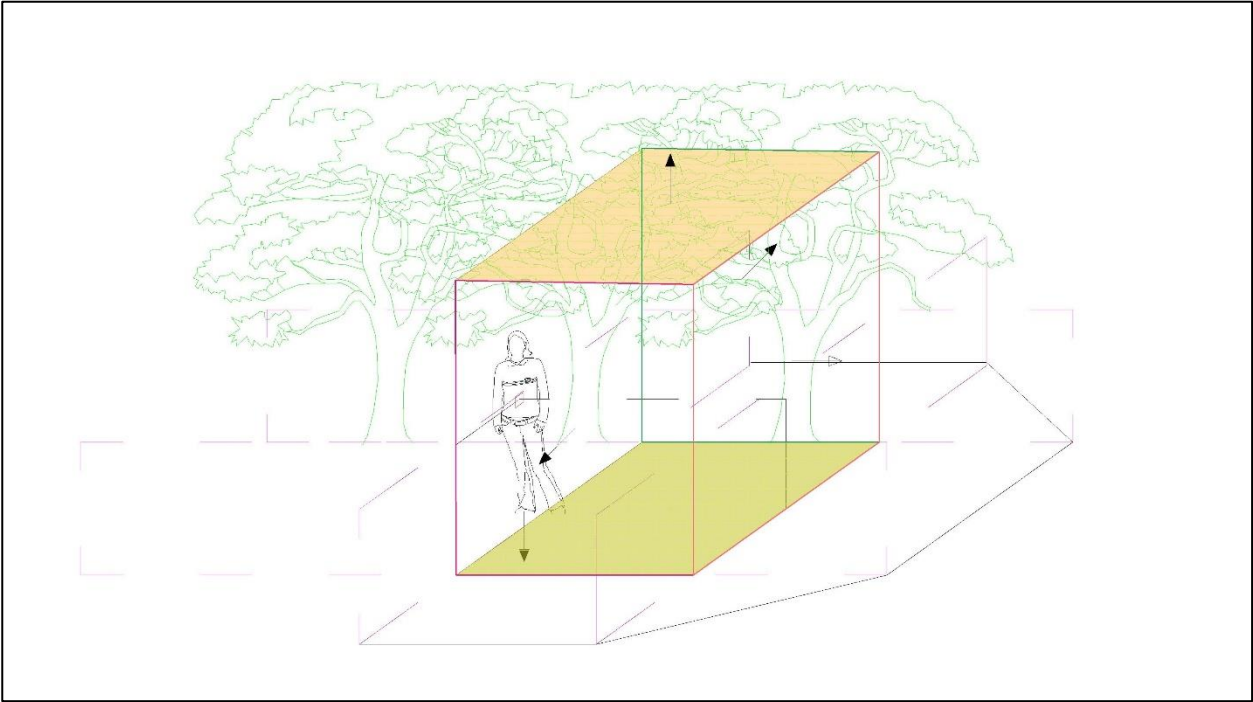


Figura 20. Visualización de superficies para el cálculo de T_{right}

Las temperaturas de las caras left, front y back son exactamente iguales, ya que las dimensiones de la cobertura, y consecuentemente del suelo, son las mismas. De diferir el ancho y el largo, los factores de forma no serían los mismos. A pesar de que variarían poco, sería bastante despreciable, por lo que se ha querido simplificar los cálculos de esta manera.

Conocidas los valores de todas las temperaturas radiantes planas, se pueden introducir en la *Ecuación 59 o 60*, en función de si la persona está sentada o de pie, para obtener la temperatura radiante media final.

6.2.1 Interfaz modelo de cobertura

En la *Figura 21* se muestra la interfaz correspondiente con el modelo de la cobertura del espacio. Se podrá insertar directamente las variables de diseño de la misma, sus dimensiones, sus transmisividades y las temperaturas de las superficies que rodean al individuo, con el fin de calcular los factores de forma entre ellas, y obtener un valor de la temperatura radiante media más exacto con el que tener en cuenta la radiación solar como flujo de calor en el balance térmico.

Hay que remarcar la importancia del valor de la temperatura radiante media ya que, a pesar de que se haya mostrado en el Apartado 4.1.2.1 cómo se podría calcular directamente la radiación directa, difusa y reflejada, el efecto de la radiación se tiene en cuenta en el balance únicamente a través de la temperatura radiante. De ahí que sea necesario un cálculo riguroso y determinante para todos los resultados.

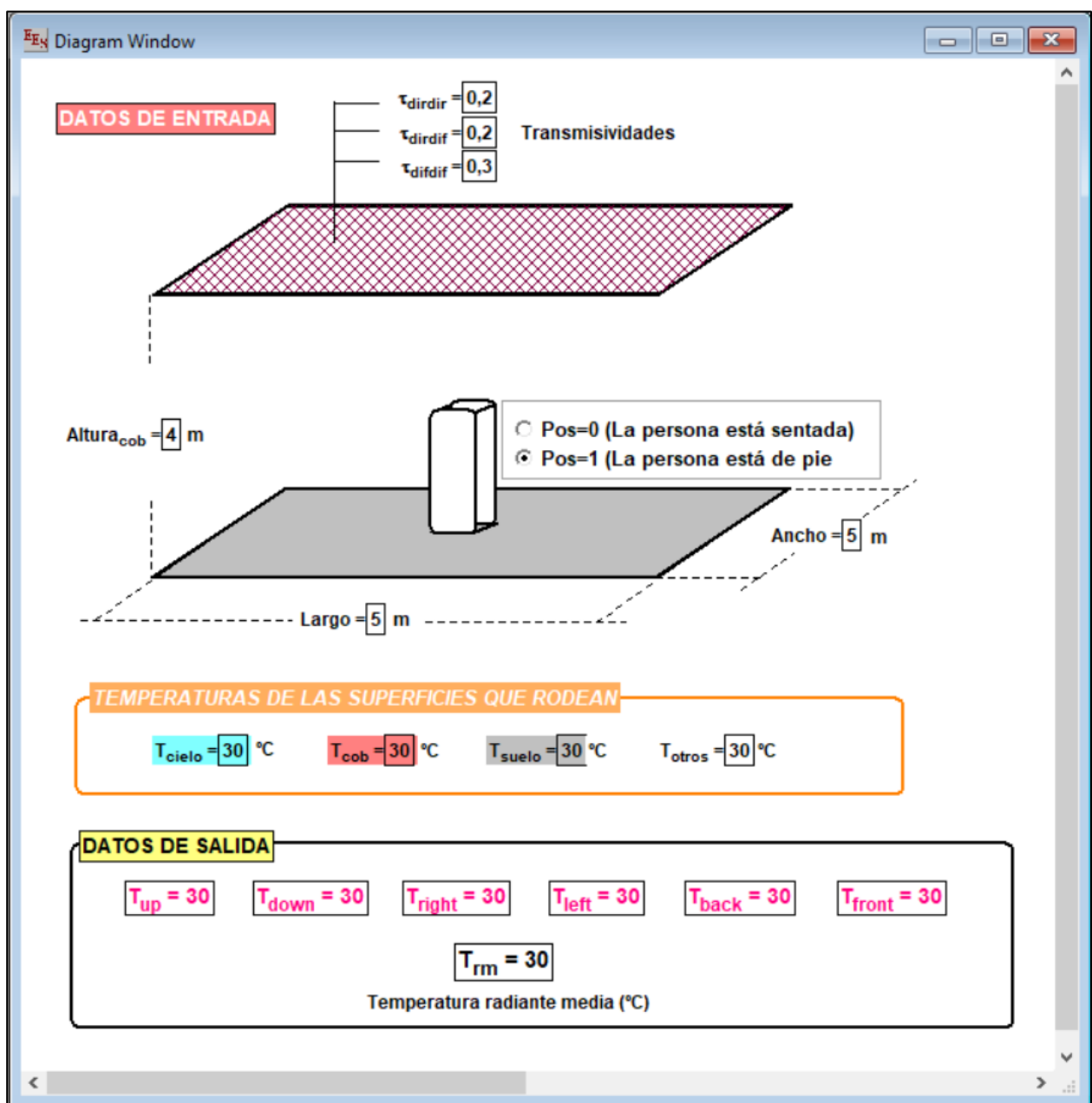


Figura 21. Interfaz modelado de la cobertura

6.2.2 Análisis de resultados de las temperaturas radiantes (ejemplo)

Siguiendo la metodología de cálculo detallada anteriormente, los resultados tanto de los factores de forma como de las temperaturas radiantes planas y radiante media, son las representadas en las siguientes tablas, para unos datos de temperaturas de los cerramientos **blindadas**.

a) RESULTADOS PARA UNA TEMPERATURA DE LOS CERRAMIENTOS HOMOGÉNEA E IGUAL A 30 °C EN CADA UNO DE ELLOS

En primer lugar, es necesario comprobar que los factores de forma de cada una de las temperaturas debe sumar la unidad.

Temperatura	FFup = FFcob	FFdown = FFsuelo	FFcielo	FFotros	ΣFF
Trp (UP)	0,4716	-	0,5284	-	1
Trp (DOWN)	-	0,7016	-	0,2983	1
Trp (RIGHT)	0,06466	0,3678	0,43534	0,1322	1

**Los factores de forma son totales, es decir, con respecto a la superficie entera (multiplicado x2 o x4 en el caso que corresponda)*

Tabla 15. Análisis de resultados de los factores de forma

Y en segundo lugar, es necesario, con el fin de comprobar que el cálculo es correcto, para una temperatura de todos los recintos iguales y de un valor de 30 °C, las temperaturas radiantes planas y por consiguiente la temperatura radiante media, deben tener el mismo resultado. A continuación se visualiza la interfaz de resultados del cálculo en EES y se aprecian las conclusiones comentadas.

	Factores de forma
	Temperatura cerramientos
	Temperaturas radiantes planas
	Temperatura radiante media

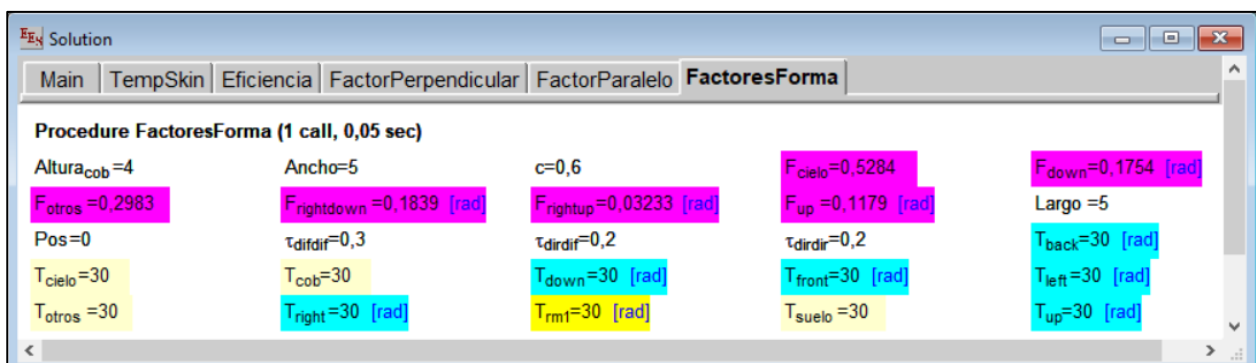


Figura 22. Modelo de resultados para evaluar el efecto de la cobertura

b) VARIACION DE LOS FACTORES DE FORMA ANTE VARIACION DE LA ALTURA DE LA COBERTURA

Como se puede apreciar en la *Tabla 16*, los factores de forma con respecto al suelo y a otros permanece invariable, ya que no depende de la variación de la altura a la que se coloque la cobertura, sino que depende de la altura *c*, fija para una persona que esté sentada o de pie.

Por el contrario, sí que sufren modificaciones los factores de forma con la cobertura y con el cielo, de en sentidos contrapuestos entre ellas. Cuanto más alta sea la cobertura, menor es la superficie que ve el elemento diferencial, de la cobertura, y mayor superficie de cielo, de ahí que el factor de forma con la cobertura disminuya, y con el cielo aumente.

H (m)	FFup = FFcob	FFdown = FFsuelo	FFcielo	FFotros
3	0,564	0,7016	0,4361	0,2983
3,5	0,516	0,7016	0,4841	0,2983
4	0,4716	0,7016	0,5284	0,2983
4,5	0,432	0,7016	0,568	0,2983
5	0,39704	0,7016	0,6029	0,2983
5,5	0,3664	0,7016	0,6336	0,2983
6	0,33952	0,7016	0,6605	0,2983

Tabla 16. Análisis de la influencia de la altura de la cobertura

c) VARIACION DE LOS FACTORES DE FORMA ANTE VARIACION DE DIMENSIONES DE LA COBERTURA

En la *Tabla 17* se muestra la variación de los factores de forma frente a un cambio en las dimensiones de la cobertura, y con lo cual del suelo. Se identifica como, al aumentar las medidas, los factores de forma con la propia cobertura y con el suelo van aumentando, ya que el elemento diferencial cada vez ve más superficie de cobertura que de cielo. Por ello, el factor de forma con el cielo a su vez, disminuye. Es por ello, que si la cobertura fuese infinita, los factores de forma con la cobertura y con el suelo deberían aproximarse a la unidad y los restantes ser nulos.

Dimensiones (m)	FFup = FFcob	FFdown = FFsuelo	FFcielo	FFotros
3X3	0,32652	0,6856	0,6735	0,3144
4X4	0,4072	0,6972	0,5929	0,3029
5X5	0,4716	0,7016	0,5284	0,2983
6X6	0,522	0,704	0,4779	0,2961
8x8	0,5912	0,7056	0,4089	0,2943
10x10	0,632	0,7064	0,368	0,2936
...
100x100	0,7072	0,7072	0,293	0,293

Tabla 17. Análisis de la influencia del tamaño de la cobertura

6.3 Interfaz final

A continuación se muestra la interfaz final del simulador (Figura 23), en la que se visualiza el efecto y modelado de ambas estrategias de acondicionamiento, tanto la cobertura como el tratamiento del aire. Adicionalmente se han incorporado ambos datos referentes a la vestimenta y al nivel de actividad del individuo para poder trabajar y obtener resultados directamente desde la interfaz, sin tener que modificar el código base.

Los resultados en evaluación, es decir, los índices de confort se representan como los datos de salida, sobre el que se pueden aplicar los tratamientos o no, ambos, uno de ellos o ninguno mediante la selección o deselección de su aplicación en la interfaz.

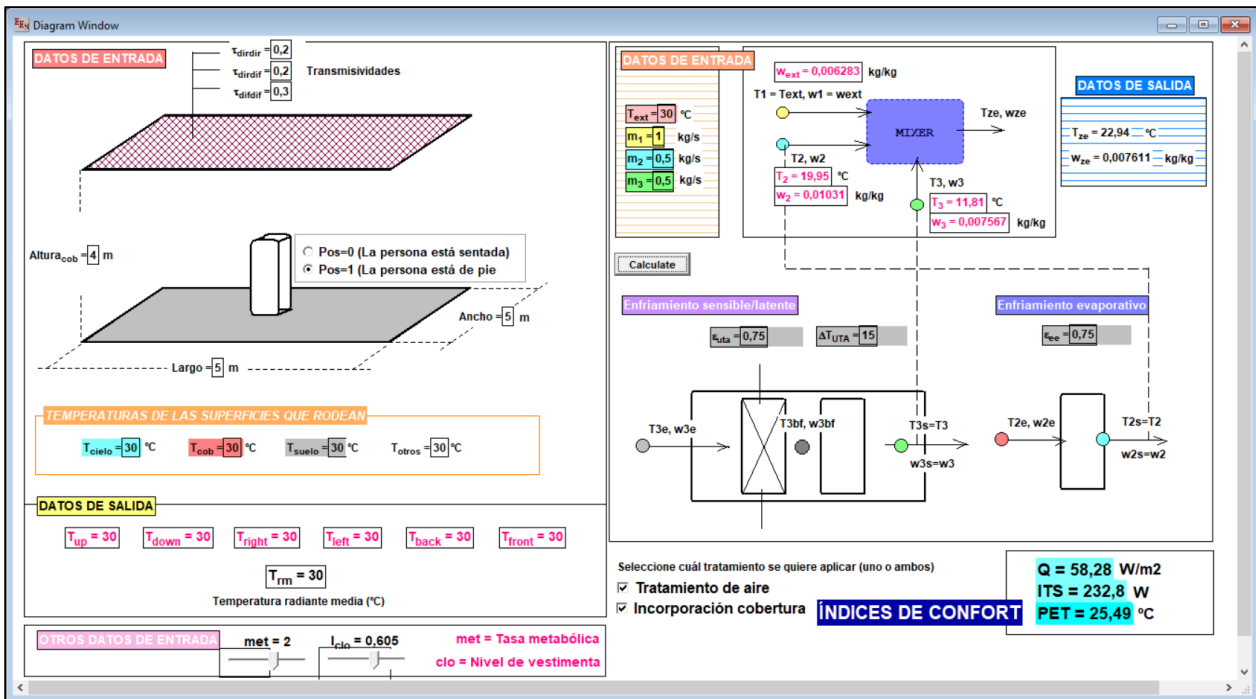


Figura 23. Interfaz final del modelo

7 ANÁLISIS DE RESULTADOS SITUACIÓN MEJORADA

Finalmente, para llevar a cabo el punto 5 de la metodología expuesta en el apartado 2 (toma de decisiones), se debe realizar unos últimos análisis de sensibilidad y de resultados para comprobar el correcto funcionamiento del modelo, y sacar conclusiones sobre si son efectivas o no las alternativas barajadas para mitigar las condiciones ambientales que habitaban el lugar.

En este caso, se va a analizar su influencia con respecto a dos índices de confort: el PET ya analizando anteriormente al ser uno de los índices más importantes a comprobar ya que era el índice que mostraba unos valores más restrictivos, y en este caso, el sweating rate en lugar del índice de confort térmico, a pesar de que realmente representen los mismos resultados pero con diferentes unidades. En ambos casos se va a representar tanto los datos resultantes de la incorporación únicamente de la cobertura, y posteriormente añadiéndole adicionalmente el tratamiento de aire.

7.1 Sweating rate

Sobre este índice se fijaba una escala de evaluación en base a tres valores:

- 30 g/h, que indicaba una permanencia prolongada en el lugar de actuación.
- 60 g/h, que indicaba una permanencia media en el lugar de actuación (1 hora).
- 90 g/h, que indicaba una permanencia muy baja en el lugar de actuación (15 minutos).

En el caso **sin aplicar el tratamiento de aire** se tienen las siguientes proporciones de resultados:

- En el 38,57 % de los casos se tienen valores inferiores a 30 g/h, situación de confort.
- En el 40 % de los casos se tienen valores entre 30 y 90 g/h, situación desfavorable.
- En el 21,43 % de los casos se tienen valores superiores a 90 g/h, situación muy desfavorable (disconfort total).

SR (g/h)		Temperatura cobertura (°C)										
		20	22	24	26	28	30	32	34	36	38	
Ta (°C)	18	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,41
	20	2,68	4,23	5,79	7,37	8,955	10,56	12,17	13,8	15,45	17,11	
	22	19,59	21,28	22,99	24,71	26,45	28,2	29,96	31,74	33,53	35,34	
	24	38,05	39,9	41,76	43,63	45,52	47,43	49,35	51,28	53,23	55,2	
	26	58,14	60,15	62,17	64,2	66,25	68,32	70,4	72,5	74,62	76,75	
	28	79,95	82,12	84,3	86,51	88,73	90,96	93,21	95,48	97,77	100,1	
	30	103,5	105,9	108,2	110,6	113	115,4	117,9	120,3	122,8	125,2	

Tabla 18. Análisis de los resultados del sweating rate en el caso modificado (sin tratamiento de aire)

Y en el caso **con aplicación del tratamiento de aire** los resultados son muy favorecedores. Esta vez se ha simulado a partir de una temperatura exterior de 24 °C, puesto que a temperaturas inferiores ya se concluía una situación de confort en el caso anterior. Se muestra en esta ocasión que se han mejorado muchos los resultados. Donde previamente eran unas condiciones cálidas o calientes, ahora están en una situación de confort, y donde previamente eran unas condiciones sofocantes, ahora se ha suavizado hasta niveles cálidos. En conclusión, se asegura un confort en el 88,57% de los casos, y en el 21,43 restante serán unas condiciones realmente soportables.

SR (g/h)				Temperatura cobertura (°C)									
				20	22	24	26	28	30	32	34	36	38
Ta (°C)	24	Tze (°C)	18,27	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,047	2,581
	26		19,84	1,355	2,892	4,442	6,006	7,583	9,174	10,78	12,4	14,03	15,68
	28		21,39	14,29	15,93	17,6	19,27	20,96	22,67	24,39	26,12	27,87	29,63
	30		22,94	28,07	29,83	31,61	33,4	35,21	37,03	38,87	40,72	42,59	44,47

Tabla 19. Análisis de los resultados del sweating rate en el caso modificado (con tratamiento de aire)

7.2 PET

En el caso del PET, se remarcan las soluciones del índice anterior, obteniendo las mismas conclusiones.

PET (°C)		Temperatura cobertura (°C)									
		20	22	24	26	28	30	32	34	36	38
Ta (°C)	18	18,06	18,23	18,4	18,57	18,74	18,9	19,07	19,24	19,41	19,58
	20	19,78	19,95	20,12	20,29	20,45	20,62	20,79	20,96	21,13	21,3
	22	21,5	21,67	21,83	22	22,17	22,34	22,51	22,68	22,85	23,02
	24	23,21	23,38	23,55	23,72	23,89	24,06	24,23	24,4	24,56	24,73
	26	24,93	25,1	25,27	25,44	25,61	25,78	25,95	26,11	26,28	26,45
	28	26,65	26,82	26,99	27,16	27,33	27,49	27,66	27,83	28	28,17
	30	28,37	28,54	28,71	28,87	29,04	29,21	29,38	29,55	29,72	29,89

Tabla 20. Análisis de los resultados del PET en el caso modificado (sin tratamiento de aire)

PET (°C)				Temperatura cobertura (°C)									
				20	22	24	26	28	30	32	34	36	38
Ta (°C)	24	Tze (°C)	18,27	18,29	18,46	18,63	18,8	18,97	19,14	19,31	19,47	19,64	19,81
	26		19,84	19,64	19,81	19,98	20,14	20,31	20,48	20,65	20,82	20,99	21,16
	28		21,39	20,97	21,14	21,31	21,48	21,65	21,82	21,99	22,16	22,32	22,49
	30		22,94	22,3	22,47	22,64	22,81	22,98	23,15	23,32	23,49	23,65	23,82

Tabla 19. Análisis de los resultados del PET en el caso modificado (con tratamiento de aire)

8 CONCLUSIONES

En la ciudad de Sevilla, el clima del área metropolitana se presenta en términos de estrés térmico, al cual se ven sometidos cualquier individuo que se exponga a sus condiciones climáticas. Esto, en numerosas ocasiones, se vuelve intolerable para una persona y en cuanto a su permanencia en un lugar durante un largo periodo de tiempo. Bien es cierto que se trata de una ciudad que se caracteriza por tener unas temperaturas elevadas durante épocas de verano, por lo que en primer lugar, en la fase de diseño de una nueva instalación, ya sea una zona urbana, o incluso edificaciones o zonas residenciales, sería ventajoso tener en cuenta dichas condiciones limitantes desde el inicio y equipar cualquier instalación contra dichos factores externos y mitigar su efecto desde el principio.

Sin embargo, no siempre ocurre así. El cambio climático, principalmente provocado por la acción humana, y la industrialización total de nuestra sociedad, trae como consecuencia la retención del calor del Sol en la atmósfera provocando el fenómeno conocido como “efecto invernadero”, influyendo de manera directa también en el aumento de temperaturas, alternación de las épocas de lluvia, crecimiento del nivel del mar y otros efectos perjudiciales. Por este motivo, puede darse la situación de que existan instalaciones o zonas urbanas diseñadas para unas condiciones climatológicas más antiguas y que el cambio climático haya degenerado en otras que resultan insoportables para la infraestructura existente en la actualidad. Es por ello que se convierte en un gran reto la adaptación de zonas urbanas a las condiciones actuales y poder afrontar así las arduas modificaciones que ha sufrido el entorno.

El estudio que se ha realizado a lo largo de este trabajo de fin de máster ha sido exactamente el de cubrir una necesidad importante, y es la de evaluar mediante unos parámetros de confort definidos previamente, la situación de comodidad en las que se encuentra un individuo ante diferentes condiciones de temperatura, humedad y radiación, en función del nivel de actividad que estén realizando y del nivel de vestimenta que lleven incorporado. Para todo ello es necesario controlar todos los flujos de calor que entran y salen del cuerpo humano para que, según un balance térmico se puedan obtener conclusiones comparando con los índices de confort seleccionados, los cuales son: la carga térmica, el índice de estrés térmico (o sweating rate) y la temperatura fisiológica equivalente (comunmente conocida como PET).

Tras en análisis inicial de la zona, denominado caso base, se pretende realizar una adaptación de dichos resultados mediante la incorporación de ciertas técnicas de acondicionamiento, ya sean infraestructuras o instalaciones que permitan suavizar, aliviar o incluso eliminar el malestar ante el que se enfrentaba un individuo en determinadas zonas de la estancia. De ahí que se haya influido sobre la temperatura radiante media y con ello sobre la radiación, mediante la incorporación de una cobertura sobre el recinto, y sobre la temperatura del espacio, mediante un tratamiento térmico del aire, todo ello programado mediante una herramienta útil y sencilla asequible para cualquier usuario.

Con ello, y con el análisis realizado de los resultados de los mismos parámetros de confort anteriores, ahora en el caso modificado, se evidencia la mejoría de resultados, conllevando a una correcta mitigación de la situación previa, remarcando así la necesidad de acondicionar lugares desaprovechados por la problemática comentada inicialmente, favoreciendo al desarrollo de zonas verdes urbanas adaptadas al cambio climático, de manera sostenible y favoreciendo al bienestar de los ciudadanos.

9 ANEXO I. TABLAS DE RESULTADOS

9.1 Resultados de los índices de confort en situación caso base: sin ningún acondicionamiento

Iclo	MET	Text	Trm	Tsk2	Tskp2	SHL_req	Q	ITS	SHL	PET
0,2	1	26	26	33,45	33,09	49	3,887	13,59	45,08	20,33
0,2	1	28	28	33,7	33,29	36,9	16,15	33,94	34,49	23,53
0,2	1	30	30	33,95	33,5	24,81	28,41	56,24	23,9	26,73
0,2	1	32	32	34,2	33,7	12,71	40,67	80,52	13,32	29,93
0,2	1	34	34	34,45	33,91	0,6102	52,93	106,8	2,734	33,13
0,2	1	36	36	34,7	34,11	-11,49	65,19	135,1	-7,852	36,34
0,2	1	38	38	34,95	34,32	-23,59	77,45	165,4	-18,44	39,54
0,2	1	40	40	35,2	34,52	-35,68	89,71	197,8	-29,02	42,74
0,2	2	26	26	33,45	33,09	39,33	42,02	136,2	45,08	20,33
0,2	2	28	28	33,7	33,29	27,23	54,45	168,3	34,49	23,53
0,2	2	30	30	33,95	33,5	15,13	66,87	202,7	23,9	26,73
0,2	2	32	32	34,2	33,7	3,035	79,29	239,5	13,32	29,93
0,2	2	34	34	34,45	33,91	-9,063	91,72	278,7	2,734	33,13
0,2	2	36	36	34,7	34,11	-21,16	104,1	320,3	-7,852	36,34
0,2	2	38	38	34,95	34,32	-33,26	116,6	364,2	-18,44	39,54
0,2	2	40	40	35,2	34,52	-45,36	129	410,4	-29,02	42,74
0,2	3	26	26	33,45	33,09	29,66	80,16	328,7	45,08	20,33
0,2	3	28	28	33,7	33,29	17,56	92,75	376,4	34,49	23,53
0,2	3	30	30	33,95	33,5	5,46	105,3	426,8	23,9	26,73
0,2	3	32	32	34,2	33,7	-6,638	117,9	480	13,32	29,93
0,2	3	34	34	34,45	33,91	-18,74	130,5	535,9	2,734	33,13
0,2	3	36	36	34,7	34,11	-30,83	143,1	594,4	-7,852	36,34
0,2	3	38	38	34,95	34,32	-42,93	155,7	655,7	-18,44	39,54
0,2	3	40	40	35,2	34,52	-55,03	168,3	719,5	-29,02	42,74
0,4	1	26	26	33,38	33,23	41,26	11,62	28,19	37,6	22,59
0,4	1	28	28	33,57	33,41	31,08	21,97	48,17	28,38	25,38
0,4	1	30	30	33,76	33,59	20,89	32,32	70,28	19,16	28,17
0,4	1	32	32	33,95	33,77	10,7	42,67	94,61	9,93	30,96
0,4	1	34	34	34,14	33,95	0,5138	53,03	121,2	0,7056	33,75
0,4	1	36	36	34,33	34,13	-9,674	63,38	150,2	-8,519	36,54
0,4	1	38	38	34,52	34,3	-19,86	73,73	181,7	-17,74	39,33
0,4	1	40	40	34,71	34,48	-30,05	84,08	215,6	-26,97	42,12
0,4	2	26	26	33,54	33,22	33,12	48,23	171,7	38,4	22,35
0,4	2	28	28	33,73	33,4	22,93	58,75	206,7	29,17	25,14
0,4	2	30	30	33,92	33,58	12,74	69,26	244,6	19,95	27,93
0,4	2	32	32	34,1	33,75	2,556	79,77	285,5	10,72	30,72
0,4	2	34	34	34,29	33,93	-7,632	90,29	329,4	1,497	33,51
0,4	2	36	36	34,48	34,11	-17,82	100,8	376,5	-7,727	36,3
0,4	2	38	38	34,67	34,29	-28,01	111,3	426,8	-16,95	39,09
0,4	2	40	40	34,86	34,47	-38,19	121,8	480,3	-26,18	41,88
0,4	3	26	26	33,69	33,2	24,97	84,85	417,6	39,19	22,11
0,4	3	28	28	33,88	33,38	14,79	95,52	474,1	29,96	24,9
0,4	3	30	30	34,07	33,56	4,598	106,2	534,5	20,74	27,69
0,4	3	32	32	34,26	33,74	-5,59	116,9	598,8	11,51	30,48

0,4	3	34	34	34,45	33,92	-15,78	127,5	667	2,289	33,27
0,4	3	36	36	34,64	34,1	-25,96	138,2	739,2	-6,936	36,06
0,4	3	38	38	34,83	34,27	-36,15	148,9	815,4	-16,16	38,85
0,4	3	40	40	35,02	34,45	-46,34	159,6	895,7	-25,39	41,64
0,6	1	26	26	33,31	33,34	35,64	17,25	40,79	32,17	24,23
0,6	1	28	28	33,44	33,5	26,84	26,21	61,07	23,94	26,72
0,6	1	30	30	33,57	33,66	18,04	35,17	83,73	15,7	29,21
0,6	1	32	32	33,7	33,82	9,242	44,13	108,9	7,466	31,7
0,6	1	34	34	33,83	33,98	0,4438	53,1	136,8	-0,7692	34,19
0,6	1	36	36	33,95	34,14	-8,354	62,06	167,5	-9,004	36,68
0,6	1	38	38	34,08	34,3	-17,15	71,02	201,2	-17,24	39,18
0,6	1	40	40	34,21	34,45	-25,95	79,98	238	-25,47	41,67
0,6	2	26	26	33,62	33,31	28,6	52,75	209,9	33,54	23,82
0,6	2	28	28	33,75	33,47	19,8	61,87	249,1	25,3	26,31
0,6	2	30	30	33,88	33,63	11,01	71	292,1	17,07	28,8
0,6	2	32	32	34,01	33,79	2,207	80,12	338,9	8,833	31,29
0,6	2	34	34	34,14	33,95	-6,591	89,25	389,8	0,5983	33,78
0,6	2	36	36	34,26	34,11	-15,39	98,37	444,9	-7,637	36,27
0,6	2	38	38	34,39	34,27	-24,19	107,5	504,5	-15,87	38,76
0,6	2	40	40	34,52	34,43	-32,99	116,6	568,7	-24,11	41,25
0,6	3	26	26	33,93	33,29	21,57	88,25	521,3	34,91	23,4
0,6	3	28	28	34,06	33,45	12,77	97,54	590	26,67	25,89
0,6	3	30	30	34,19	33,6	3,971	106,8	664,2	18,44	28,38
0,6	3	32	32	34,32	33,76	-4,827	116,1	744,1	10,2	30,88
0,6	3	34	34	34,45	33,92	-13,63	125,4	829,9	1,966	33,37
0,6	3	36	36	34,57	34,08	-22,42	134,7	921,8	-6,269	35,86
0,6	3	38	38	34,7	34,24	-31,22	144	1020	-14,5	38,35
0,6	3	40	40	34,83	34,4	-40,02	153,3	1164	-22,74	40,84

10 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] ASHRAE (American Society of Heating and Refrigeration Engineers) Fundamentals (SI Edition) Chapter 9. Thermal Comfort. (2017). En *ASHRAE Handbook* (SI Units ed., pp. 180-212).

[2] International Organization for Standardization UNE-EN ISO 7933. Ergonomía del ambiente térmico: Determinación analítica e interpretación del estrés térmico mediante el cálculo de la sobrecarga térmica estimada. (2005)

[3] Grupo de Termotecnia, Departamento de Ingeniería Energética y Mecánica de Fluidos. Guerra Macho, J.J., Álvarez Domínguez, S., Molina Félix, J.L., & Velázquez Vila, R. (1994). *GUÍA BÁSICA PARA EL ACONDICIONAMIENTO CLIMÁTICO DE ESPACIOS ABIERTOS* (1.a ed.). Universidad de Sevilla.

[4] Enescu, D. (2019). Models and Indicators to Assess Thermal Sensation Under Steady-state and Transient Conditions. *Energies MDPI*. Published.

[5] Coccolo, S., Kämpf, J., Scartezzini, J.-L., & Pearlmutter, D. (2016). Outdoor human comfort and thermal stress: A comprehensive review on models and standards. *Urban Climate*, 33-57.

[6] Velázquez, R., Álvarez, S., & Guerra, J. (1992, marzo). CONTROL CLIMÁTICO DE LOS ESPACIOS EN EXPO'92. *DYNA*, 2.

[7] Kyle, W.J. (1992). Summer and Winter Patterns of Human Thermal Stress in Hong Kong. *World Scientific*. Published.

[8] Höppe, P. (2002). Different aspects of assessing indoor and outdoor thermal comfort. *ENERGY and Buildings*, 34.

[9] Höppe, P. (1999, 26 junio). The physiological equivalent temperature – a universal index for the biometeorological assessment of the thermal environment. *Int J Biometeorol*, 43: 71-75.

[10] Gaitani, N. Mihalakakou, G., Santamouris, M., 2007. On the use of bioclimatic architecture principles in order to improve thermal comfort conditions in outdoor spaces. *Build. Environ.* 42, 317-324.

[11] Boundary Layers Climates Fundamentals. (1978). Oke, T.R. (Second Edition). Published.

[12] J. Pickup, R. de Dear, An outdoor thermal comfort index (OUT_SET*) – part 1- the model and its

assumptions. In: *Biometeorology and urban climatology at the turn of the millennium*. De Dear, Kalma, Oke and Auliciems (Eds.) World Meteorological Organization.

[13] Matzarakis, A., Mayor, J., Iziomon, M.J., 1999. Applications of universal thermal index: physiological equivalent temperatura. *Int J. Biometeorol.* 43, 76-84.

[14] *Urban Climates*, 2017. Oke, T.R., Mills, G., Christen, A., & Voogt, J.A. *Cambridge University Press*.

[15] Tanabe, S. et al. (1993). Estimation of thermal sensation using PMV and SET* under high air movement conditions. *J. Therm. Biol.* 18(5/6): 551-554.

[16] International Organization for Standardization UNE-EN ISO 7726:1998. Ergonomía de los ambientes térmicos. Instrumentos de medida de las magnitudes físicas (1998).