

Trabajo Fin de Máster

Máster Universitario en Ingeniería Industrial

Control climático de espacios abiertos en una escuela de educación primaria en Sevilla

Autor: Mercedes Rebollo Molinos

Tutor: Servando Álvarez Domínguez

Departamento de Ingeniería Energética

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2019



Trabajo Fin de Máster
Máster Universitario en Ingeniería Industrial

Control climático de espacios abiertos en una escuela de educación primaria en Sevilla

Autor:

Mercedes Rebollo Molinos

Tutor:

Servando Álvarez Domínguez

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

Sevilla, 2019

El tribunal nombrado para juzgar el Trabajo Fin de Máster arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2019

El Secretario del Tribunal

A mis abuelos, a mis padres y a mi hermana.

Agradecimientos

Quiero agradecer la labor de D. Servando Álvarez Domínguez, Catedrático del Departamento de Ingeniería Energética de la Universidad de Sevilla, por su docencia ejemplar, apoyo y seguimiento del presente trabajo a lo largo de su duración y por confiar en mí para ello.

A D. Francisco José Sánchez de la Flor, profesor Doctor del Área de Máquinas y Motores Térmicos de la Universidad de Cádiz y a D. Enrique Ángel Rodríguez Jara por su colaboración y ayuda constantes.

A mi familia y amigos, por acompañarme en esta etapa que por fin termina.

Mercedes Rebollo Molinos

Sevilla, 2019

El confort térmico en espacios exteriores es una de las características de la calidad del medio ambiente urbano. El espacio público exterior de las ciudades puede propiciar en el habitante el sentido de pertenencia social a través de las diversas actividades que en él se realizan, sin embargo, al no tener las condiciones adecuadas de ambiente térmico, se limitan los periodos y horarios de uso. Es por ello por lo que es de suma importancia estimar las sensaciones térmicas en dichos lugares previamente para poder establecer las bases para una correcta toma de decisiones en el diseño urbano.

El control climático de espacios exteriores ya construidos se llevará a cabo, previo estudio del caso en concreto, a través de distintos recursos para suavizar las condiciones de habitabilidad, como el confinamiento de masas de aire o apantallamiento, uso de coberturas, enfriamiento de las mismas mediante riego o enfriamiento evaporativo. Serán estos recursos los que se utilizarán para adecuar las condiciones climáticas del espacio en estudio.

El presente Trabajo Fin de Máster, dentro de un marco de análisis e investigación, recoge el análisis de situación, cálculo y propuesta de mejora de las condiciones de confort de un espacio exterior de uso escolar ya existente, situado en un Colegio de enseñanza pública en la ciudad de Sevilla.

El proyecto se estructura en tres partes diferenciadas; una introducción y revisión de recursos en la que se plantea la propuesta de proyecto sobre una base descriptiva, una parte dedicada al desglose de los distintos escenarios planteados, y un último punto que recopila las distintas medidas de mejora propuestas.

Para su realización se ha empleado distinto software, tal como ENVImet, que ha permitido realizar a pequeña escala el modelo climático del espacio a tratar, Leonardo y Plotly, utilizados para la representación gráfica de distintas magnitudes, y Simthesys, para la traducción de código a un lenguaje manejable.

Además, se ha partido del proyecto de arquitectura para acceder a determinada información del entorno, composición de cerramientos y dimensiones de las zonas.

Thermal comfort in outdoor spaces is a feature of an urban environment of quality. Outer public spaces promote the sense of social belonging in inhabitants through all the activities that can be developed in them. However, in the case of absence of appropriate thermal environment conditions, the hours of use of these spaces can be limited.

Indeed, it is for that reason that the previous estimation of thermal sensations in these spaces plays an important role. Through this practice, it will be possible to establish the bases for a correct decision making in respect to urban design.

Climate control of existing outdoor spaces will be carried out through different resources to soften the habitability conditions, such as the confinement of air masses or shielding, use of covers, evaporative cooling... These will be the resources that will be used to adapt the comfort conditions of the case study.

This Masters Thesis, within a framework of analysis and research, includes the analysis of the situation, calculations and proposals to improve the comfort conditions in an existing outdoor space for scholar use, located in a public school in the city of Seville.

The project is structured in three different parts; an introduction and review of resources in which the project proposal is presented on a descriptive basis, a part dedicated to the breakdown of the different scenarios, and a final point that compiles the different proposed improvement measures.

For its completion, different software has been used, such as ENVImet, which has made it possible to make the climate model of the space to be treated on a small scale, Leonardo and Plotly, used for the graphic representation of different magnitudes, and Simthesys, for the translation of code into a manageable language.

In addition, the architecture project has been used to access certain information about the environment, composition of enclosures and dimensions of the areas.

Índice de contenido

1. Introducción.....	18
2. Estado del arte	18
2.1 Condiciones climatológicas del entorno.....	18
2.2 El modelo de confort.....	20
2.2.1. El modelo matemático	25
2.3 Confort térmico en espacios abiertos en la actualidad.....	27
2.4 Recursos	31
2.4.1 Revisión de herramientas de cálculo.....	31
3. Casos de Estudio	32
3.1 Metodología.....	32
3.2 Emplazamiento.....	33
3.3 Descripción del espacio.....	34
3.4 Definición inicial de parámetros.....	35
3.4.1 Configuración del dominio	35
3.4.2. Periodo de simulación	38
3.4.3 Suelos.....	38
3.4.4. Datos climáticos	40
3.6 Escenario sin obstáculos	44
3.7 Escenario real.....	45
3.7.1 Campo de viento.....	47
3.7.2 Campo de temperatura	48
4. Medidas de mejora	49
4.1 Confinamiento del espacio	49
4.1.1 Estrategia de confinamiento 1	50
4.1.2 Estrategia de confinamiento 2	52
4.1.3 Estrategia de confinamiento 3	54
4.2 Coberturas.....	56
4.2.1 Modelo de cálculo para elemento de sombra	57
4.2.2 Cálculo de temperatura de cobertura	58

4.2.3 Cálculo temperatura radiante.....	61
4.3 Enfriamiento evaporativo	66
4.4 Índices de confort.....	69
4.4.1 Temperatura radiante media	69
4.4.2 Tasa de sudoración SW	69
5. Análisis del confort: casos de estudio	78
5.0 Hipótesis de trabajo.....	80
5.1 Caso de referencia	82
5.2 Caso 1	84
5.3 Caso 2.....	84
5.4 Caso 3.....	85
5.5 Casos 4, 5 y 6.....	88
5.6 Caso 7	90
5.7 Caso 8.....	92
5.8 Caso 9.....	94
5.9 Caso 10.....	97
6. Conclusiones generales	100
7. Referencias bibliográficas	103

1. Introducción

La necesidad de investigación sobre la sensación térmica percibida en exteriores se ha observado en eventos como juegos olímpicos y exposiciones universales. Las aportaciones derivadas de esos trabajos tienen aplicaciones en proyectos de tipo turístico o recreativo a menor escala. El estudio que se presenta se desarrolla en un periodo cálido de un clima cálido seco en un espacio público exterior.

La iniciativa de realizar este Trabajo Fin de Máster nace de que el espacio que a continuación se presentará quedaba inutilizado durante los meses lectivos próximos al verano, debido a altas temperaturas que se alcanzaban en él, por la confluencia de distintas circunstancias. Es sobre estos meses sobre los que se ha elaborado el estudio, analizando el caso inicial y de referencia y las distintas soluciones constructivas propuestas.

En esencia, este trabajo tiene como objetivo el análisis climático de un espacio exterior real, y proponer medidas realizables para contrarrestar los efectos negativos de la climatología, solucionando el problema planteado.

2. Estado del arte

2.1 Condiciones climatológicas del entorno

En función de las condiciones climatológicas de cierto espacio exterior, un espacio escolar público en el caso de estudio, se le asigna un uso y un tiempo de ocupación determinado.

El acondicionamiento de este tipo de espacios es significativamente distinto al acondicionamiento de espacios interiores, ya que las condiciones termohigrométricas de este último son más controlables desde el punto de vista operativo. Resulta más fácil aislar al individuo de condiciones no deseadas, ya sea a través de la calidad constructiva de los elementos arquitectónicos y una buena definición de la envolvente o sistemas mecánicos de climatización en su defecto.

De hecho, existe una diferencia importante desde un punto de vista metodológico: mientras que en un espacio interior la noción de confort aparece en las etapas finales de diseño, al evaluar las prestaciones del sistema, en un espacio exterior el confort

térmico está siempre presente a través del proceso de diseño, incluso en las etapas previas al diseño.

Además, son más las variables que influyen en el confort de espacios exteriores (como la radiación incidente o la velocidad del viento) y el grado de manipulación de cada una de ellas. Es por ello por lo que el número de actuaciones posibles sobre estos espacios se ve incrementada.

Según el apéndice D del Documento Básico HE-1, la ciudad de Sevilla se encuentra la zona climática B4, caracterizada por una severidad climática baja en invierno y una severidad climática alta de verano.

Sevilla es la capital de provincia más cálida de la península ibérica debido a su temperatura media en periodo estival, en donde se pueden alcanzar temperaturas máximas que “de promedio” superan los 33-37°C (sobre todo en los meses de julio y agosto). Se superan los 32°C absolutos unas 70 jornadas de promedio al año, y llegar a los 40°C no resulta especialmente singular en un verano en Sevilla capital.

Además, en cuanto a humedad, se considera un clima árido o seco.

Estas circunstancias y características térmicas ponen de manifiesto el grado de dificultad existente en el emplazamiento del colegio a la hora de alcanzar un nivel de confort aceptable en exteriores sin un previo estudio y actuación posterior sobre el espacio.

El ya mencionado término “confort térmico” hace referencia al estado en el que se encuentra un individuo si no tiene ningún tipo de incomodidad térmica. La primera condición de comodidad es la neutralidad térmica, que significa que una persona no siente ni demasiado calor ni demasiado frío.

Por su parte, el confort térmico es definido por la ASHRAE 55 y UNE-EN ISO 7730 como el "estado de la mente que expresa satisfacción con el ambiente térmico". Se señala que este es alcanzado cuando el cuerpo está en balance térmico, es decir, cuando realizando cierta actividad, no se experimenta un estrés térmico para corregir la energía que produce el cuerpo internamente, manifestado a través de la transpiración excesiva o escalofríos.

Las condiciones climáticas del espacio en estudio son también consecuencia del conocido efecto Isla de Calor en entornos urbanos.

Isla de calor urbana es el nombre que se usa para describir el calor característico tanto de la atmósfera como de las superficies en las ciudades (o áreas urbanas) comparadas con sus entornos no urbanizados. La isla de calor es un ejemplo de modificación climática no intencional cuando la urbanización le cambia las características a la superficie y a la atmósfera de la tierra. Este fenómeno puede manifestarse tanto de día como de noche y su intensidad es determinada por el balance térmico de la región urbana, pudiendo alcanzar hasta 10°C de diferencia con su entorno.

Los factores que generan este fenómeno dependen del clima, de la topografía o de la configuración urbana, aunque los más importantes son:

- La reducción de las superficies de evaporación, debido a la sustitución de superficies vegetales por edificios o construcciones del tipo calles, asfalto, plazas...
- La diferencia en el modo de absorción de la radiación de los distintos materiales que rodean el espacio, debida a distinta reflectividad, absorción, inercia térmica, geometría de los cañones y emisión de superficies en onda larga. La característica del suelo del espacio que más influye en este efecto es la reflectividad.
- Calor generado por industrias, coches o fuentes antropogénicas
- Contaminación atmosférica y efecto invernadero ocasionado por las partículas en suspensión

2.2 El modelo de confort

Para poder alcanzar las condiciones climáticas deseadas, será necesario disponer de una herramienta que tenga en cuenta las influencias relativas en los espacios exteriores y permita diseñar eficientemente las diferentes actuaciones orientadas a su acondicionamiento.

Esta herramienta es el modelo de confort, cuya utilidad ha sido establecer criterios generales de acondicionamiento a partir del orden de magnitud de los distintos factores que influyen sobre el confort.

El objetivo del uso del modelo de confort térmico no es conocer si una persona en un espacio abierto se siente confortable o no en una situación dada. El problema que se

plantea es conocer entre un conjunto de distintas soluciones, cuál presenta un mayor nivel de confort. Estas soluciones, tras realizar un análisis exhaustivo del espacio, se analizarán en profundidad en el punto 5 de esta memoria.

Desde el punto de vista térmico, un individuo interactúa con su ambiente próximo mediante diferentes mecanismos de transferencia de calor y masa. Los mecanismos que tienen lugar a nivel superficial del cuerpo humano (en las capas más externas de la vestimenta o en la superficie de la piel expuesta) son los siguientes:

- Convección entre la superficie del cuerpo y el aire exterior \dot{Q}_{cv} .
- Intercambio radiante de larga longitud de onda entre la superficie del cuerpo y el cielo \dot{Q}_{rd}^{cielo} , y entre dicha superficie y el resto de las superficies del entorno urbano \dot{Q}_{rd}^{ent} .
- Evaporación de agua en la superficie del cuerpo debida a la sudoración y a la difusión de vapor agua a través de la piel, \dot{m}_{evap} .
- Pérdidas de calor latente en la superficie del cuerpo a causa de la sudoración \dot{Q}_{evap}^{sud} , y a causa de la difusión de vapor de agua a través de la piel \dot{Q}_{evap}^{dif} ($\dot{Q}_{evap} = \dot{Q}_{evap}^{sud} + \dot{Q}_{evap}^{dif}$).
- Flujo de calor absorbido debido a la radiación solar incidente en la superficie del cuerpo $\dot{Q}_{solar} = \dot{Q}_{solar}^D + \dot{Q}_{solar}^{dif} + \dot{Q}_{solar}^{ref}$.

Además de estos fenómenos superficiales, el individuo experimenta un intercambio de calor sensible \dot{Q}_{resp}^{sen} y latente \dot{Q}_{resp}^{lat} con el ambiente debido al flujo de aire durante la respiración \dot{m}_{resp} ($\dot{Q}_{resp} = \dot{Q}_{resp}^{sen} + \dot{Q}_{resp}^{lat}$).

En la [Imagen 1](#) se muestran los fenómenos de transferencia de calor y masa señalados anteriormente.

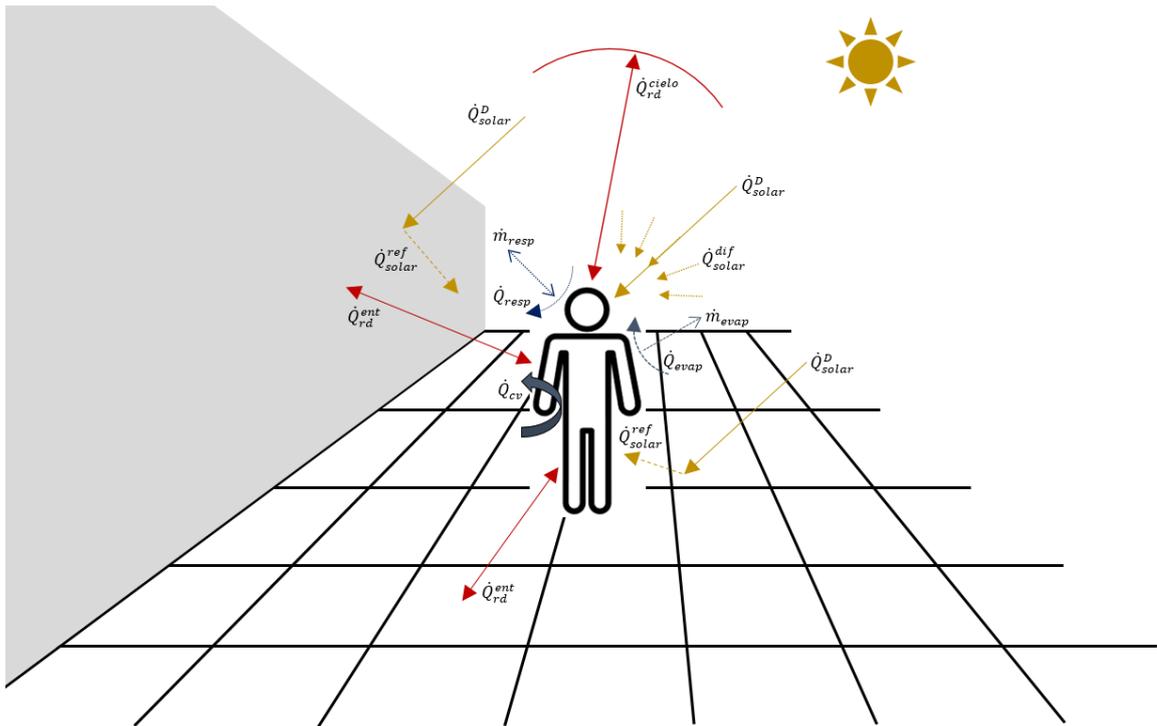


Imagen 1. Fenómenos de transferencia de calor y masa entre un individuo y su ambiente próximo

Por su parte, el propio individuo genera calor en su interior debido a las actividades metabólicas del cuerpo humano. Ya que la mayoría de este calor interno generado es disipado al ambiente a través de la piel, para mantener los valores normales de la temperatura del cuerpo, es a menudo caracterizado en términos de producción de calor por unidad de área de piel, y se simboliza como M . Para una persona sentada, en reposo, M es aproximadamente 58.15 W/m^2 . Existe una unidad equivalente para expresar M , de uso más común, denominada met, de forma que 58.15 W/m^2 equivale a 1 met. Este dato está basado sobre un europeo medio de sexo masculino, con una altura de 1.73 m y un peso 70 kg, lo que equivale a un área de la superficie de la piel de aproximadamente 1.8 m^2 , tal y como especifica el estándar 55 de ASHRAE sobre las condiciones térmicas en el exterior para la ocupación humana. El área de la superficie de la piel también se denomina área de DuBois, y se simboliza como A_D .

La producción de calor metabólico M varía ampliamente en función de la actividad física llevada a cabo, de la persona, y de las condiciones bajo las cuales se realiza la actividad. La 0 lista valores típicos de M para un adulto medio con un área de piel de 1.8 m^2 y para varias actividades que son mantenidas en el tiempo. En el caso en el que se alternen diferentes tipos de actividades durante diferentes periodos de tiempo, o se combinen periodos de trabajo y de descanso, un valor de M calculado como la media ponderada de las diferentes actividades con su periodo de tiempo

puede ser usado (ASHRAE). La exactitud de los valores listados en la 01 depende del propio valor de M y de la precisión con la que pueda ser definida la actividad. Para actividades bien definidas con $M < 1.5$ met, los valores son suficientemente precisos para la mayoría de los casos prácticos en ingeniería, mientras que para valores de $M > 3$ met y actividades pobremente definidas, los valores de la tabla pueden llegar a tener una desviación de $\pm 50\%$ respecto del valor real (ASHRAE).

TABLE 5.2.1.2 Metabolic Rates for Typical Tasks

Activity	Metabolic Rate		
	Met Units	W/m ²	(Btu/h-ft ²)
Resting			
Sleeping	0.7	40	(13)
Reclining	0.8	45	(15)
Seated, quiet	1.0	60	(18)
Standing, relaxed	1.2	70	(22)
Walking (on level surface)			
0.9 m/s, 3.2 km/h, 2.0 mph	2.0	115	(37)
1.2 m/s, 4.3 km/h, 2.7 mph	2.6	150	(48)
1.8 m/s, 6.8 km/h, 4.2 mph	3.8	220	(70)
Office Activities			
Reading, seated	1.0	55	(18)
Writing	1.0	60	(18)
Typing	1.1	65	(20)
Filing, seated	1.2	70	(22)
Filing, standing	1.4	80	(26)
Walking about	1.7	100	(31)
Lifting/packing	2.1	120	(39)
Driving/Flying			
Automobile	1.0–2.0	60–115	(18–37)
Aircraft, routine	1.2	70	(22)
Aircraft, instrument landing	1.8	105	(33)
Aircraft, combat	2.4	140	(44)
Heavy vehicle	3.2	185	(59)
Miscellaneous Occupational Activities			
Cooking	1.6–2.0	95–115	(29–37)
House cleaning	2.0–3.4	115–200	(37–63)
Seated, heavy limb movement	2.2	130	(41)
Machine work			
sawing (table saw)	1.8	105	(33)
light (electrical industry)	2.0–2.4	115–140	(37–44)
heavy	4.0	235	(74)
Handling 50 kg (100 lb) bags	4.0	235	(74)
Pick and shovel work	4.0–4.8	235–280	(74–88)
Miscellaneous Leisure Activities			
Dancing, social	2.4–4.4	140–255	(44–81)
Calisthenics/exercise	3.0–4.0	175–235	(55–74)
Tennis, single	3.6–4.0	210–270	(66–74)
Basketball	5.0–7.6	290–440	(90–140)
Wrestling, competitive	7.0–8.7	410–505	(130–160)

Tabla 1. Valores típicos de producción de calor metabólico M para varias actividades y para un adulto medio ($A_D = 1.8 \text{ m}^2$).

2.2.1. El modelo matemático

El modelo matemático de confort térmico que se utilizará está basado en el modelo capacitivo de dos nodos de Pierce, en inglés, *The Pierce Two-Node model*, el cual fue desarrollado en la *John B. Pierce Foundation* de la Universidad de Yale. Este modelo es una simplificación de los modelos desarrollados previamente por (Stolwijk, J.A.J y Hardy, J.D., 1966), y fue publicado por primera vez en 1970 (Gagge, y otros, 1970), siendo la versión más reciente de 1986 (Gagge, y otros, 1986). Es uno de los modelos de confort térmico más empleados y, por ejemplo, está implementado en EnergyPlus (EnergyPlus, 2016).

El modelo considera que el cuerpo humano está dividido en dos zonas térmicas, una zona que representa la piel y otra que representa la parte interna del cuerpo, asociando a cada una de estas zonas una temperatura uniforme y una inercia térmica. Es decir, que el modelo está compuesto por dos nodos capacitivos, uno en la zona correspondiente a la piel y otro en la zona correspondiente al interior del cuerpo humano, existiendo un gradiente de temperatura entre ambas zonas. La zona correspondiente a la piel simula la epidermis y la dermis, y su masa es aproximadamente el 10% de la masa total del cuerpo, dependiendo de la cantidad de sangre que fluye a través de esta zona como mecanismo de termorregulación del cuerpo. En la zona que representa el interior del cuerpo es donde se genera el calor metabólico M . En ambientes fríos, el temblor causado por la tensión muscular puede generar una producción adicional de calor metabólico, simbolizado como M_{shiv} . Esta producción adicional de calor metabólico es un mecanismo termorregulador del cuerpo, y está relacionada con el descenso de las temperaturas de la piel y del interior del cuerpo con respecto de sus valores normales, 34°C y 37°C, respectivamente. M_{shiv} está expresado por unidad de área de DuBois, y puede ser calculado como:

$$M_{shiv} = 19.4 \cdot (34 - T_{piel}) \cdot (37 - T_c)$$

donde T_{piel} y T_c representan la temperatura de la piel y del interior del cuerpo, respectivamente. En el caso de que los términos de gradientes de temperatura de la Ecuación (3.121) sean negativos, el valor de M_{shiv} es establecido a cero.

Bajo condiciones de ambientes cálidos, el calor transferido entre las zonas del interior del cuerpo humano y de la piel depende del flujo de sangre que circula desde la primera zona a la segunda. Un determinado flujo de sangre es enviado desde el interior del cuerpo hacia la piel como mecanismo de refrigeración. Este flujo de sangre periférica depende de las desviaciones de las temperaturas del interior del

cuerpo y de la piel con respecto de sus valores normales. Se expresa por unidad de área de DuBois, y puede ser calculado como:

$$\dot{V}_{bl} = \frac{6.3+50 \cdot (T_c-37)}{1+0.5 \cdot (34-T_{piel})}$$

donde \dot{V}_{bl} está expresado en L/(m²·h). En la ecuación los términos de gradientes de temperatura son establecidos a cero en el caso de que sean negativos, y además \dot{V}_{bl} es limitado a un valor máximo de 90 L/(m²·h).

La Imagen 2 representa la analogía eléctrica del modelo, en la que se muestran los diferentes mecanismos de transferencia de calor y masa que tienen lugar entre el cuerpo humano y su entorno.

Bajo la hipótesis de estado estacionario, un balance de energía aplicado en la superficie de la piel (representada en la Figura 3.34 por el nodo T_{piel}) resulta:

$$M - \dot{W} = \dot{Q}_{cd}^{vest} + \dot{Q}_{evap} + \dot{Q}_{resp}$$

donde W representa cualquier trabajo mecánico realizado por el individuo sobre el entorno. La Ecuación 3.120 indica que la producción neta de calor en el cuerpo humano $M-W$, es transferida al ambiente, desde la piel, a través de la vestimenta y por medio del tracto respiratorio.

Por otra parte, un balance de energía en la superficie exterior de la vestimenta (representada en la Figura 2 por el nodo T_{vest}) resulta:

$$\dot{Q}_{cd}^{vest} = \dot{Q}_{cv} + \dot{Q}_{rd} - \dot{Q}_{solar}$$

La descripción matemática de cada uno de los mecanismos de transferencia de calor y masa que aparecen en las Ecuaciones 3.120 y 3.121 está basada en los fundamentos de transferencia de calor y masa, y los valores de los coeficientes que intervienen en esta descripción matemática son determinados mediante expresiones empíricas. También, ecuaciones empíricas son usadas para obtener los valores de los mecanismos de control termoregulatorio ($Q_{c,piel}$, M_{shiv} y $Q_{evapsud}$). Además, es usual expresar todos los términos de estas ecuaciones en términos de flujo de calor por unidad de área de superficie de piel (superficie del cuerpo desnudo), y una expresión empírica es usada para determinar dicha área.

El cálculo de los términos de la ecuación no se incluirá en este apartado.

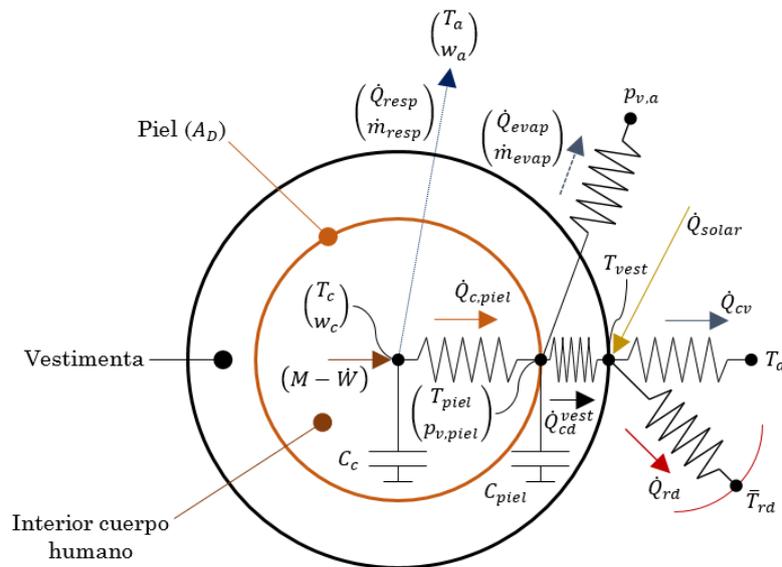


Imagen 2. Analogía eléctrica de los intercambios térmicos en el cuerpo humano con su entorno

En el punto 4.4 se expondrán los índices de confort en exteriores que serán utilizados para comparar las distintas soluciones propuestas.

2.3 Confort térmico en espacios abiertos en la actualidad

El confort térmico, para las personas que se encuentran en espacios abiertos, es uno de los factores que influye en las actividades al aire libre en calles, plazas, parques infantiles, parques urbanos, etc. La cantidad e intensidad de esas actividades se ve afectada por el nivel de incomodidad experimentado por los usuarios cuando se exponen a las condiciones climatológicas de esos espacios abiertos.

El confort térmico es, según la ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers), aquella condición de la mente que expresa satisfacción con el ambiente térmico. Givoni, B. (1989:7) lo define, por su parte, como “la ausencia de irritación o malestar térmico”, definida por las condiciones climáticas consideradas como aceptables y cómodas en el interior de los edificios. Ello implica una ausencia de cualquier sensación de térmica (calor o frío).

El confort térmico depende de distintos parámetros. De modo específico, cuatro parámetros físicos caracterizan el ambiente térmico y determinan las condiciones de confort (Givoni, 1976; Berger, 1993; Angelica Ruiz, 2009):

1. **La temperatura del aire:** afecta los intercambios de calor con y sin transferencia de masa (secos y húmedos), así como el coeficiente de transferencia de calor.
2. **Velocidad del viento:** afecta en gran medida las pérdidas por convección y evaporación. Cerca del cuerpo vestido, el movimiento del cuerpo puede incrementar la velocidad. Una velocidad mínima de 0,1 m/s, existe siempre, debido a un movimiento permanente de aire natural en todas partes.
3. **Humedad relativa:** presenta un pequeño impacto cuando no hay sudor, entonces, el intercambio de calor latente respiratorio y la transpiración de la piel son las dos únicas transferencias asociadas a la humedad. De lo contrario, la humedad del aire afecta fuertemente la evaporación del sudor, y, por lo tanto, la humedad de la piel.
4. **La temperatura media radiante:** que es la temperatura superficial uniforme de un recinto negro con el cual un individuo intercambia el mismo calor por radiación, que el que intercambia con el entorno real evaluado. Para los espacios exteriores, la temperatura media radiante representa la temperatura superficial uniforme de un recinto ficticio, en el que todas las superficies del recinto se encuentran en la misma temperatura (Matzarakis y Mayer, 2000)

En un espacio exterior, la forma o disposición de los edificios influyen en el microclima urbano en diferentes aspectos:

- Cantidad de radiación entrante
- Reflexión de onda
- Absorción de onda corta y emisión de onda larga
- El viento

Por ejemplo, en una calle estrecha se reduce el aprovechamiento solar, pero a la vez dificulta la ventilación y, en consecuencia, la disipación del calor acumulado por edificios en las horas nocturnas.

La percepción del confort térmico se ve influenciada por variables ambientales, fisiológicas, psicológicas y socioculturales. A la hora de evaluar el confort térmico en una determinada zona, es importante recordar que la percepción térmica constituye un proceso complejo del cerebro humano, el cual, debido a la individualidad, puede

variar considerablemente de un usuario a otro, pese a que las circunstancias del entorno sean las mismas.

Nikoloupoulou y Steemers (2003) sugieren que, en la adaptación fisiológica y psicológica, la naturalidad, la experiencia, el tiempo de exposición y la percepción sobre el control, son factores muy importantes para la sensación de bienestar térmico. Y la experiencia lo es especialmente, ya que se vuelve fundamental para comprender que en la sensación de bienestar no influyen solo las componentes ambientales y de adaptación fisio-psicológica, sino también otros parámetros subjetivos (Irina Tumini, 2015).

Tipo de adaptacion	Descripción	Estado
Física	Todas las acciones operadas por el individuo de forma consciente para regular su codicion de confort térmico: aumentar o reducir el arropamiento, cambiar de posicion o cambiar el propio metabolismo	Voluntario y reactivo
Fisiológica	Se considera los mecanismos de aclimatación generados por el cuerpo y que se diferencian según las reacciones fisiológicas en: instantáneas, estacionales o genéticas	No consciente o involuntario
Psicológica	El espacio comfortable se define como aquel en el que las personas se sienten en condición de ienestar térmico. Los factores que influyen en la sensación de bienestar dependen de la percepción del espacio y de los fenómenos que se producen en él.	Perceptivo o no consciente

Tabla 2. Tipo de adaptación térmica de las personas a su entorno. Fuente: Elaboración propia a partir de Cena y Clark, 1981; Höppe, 1999; Nikolopoulou y Steemers, 2003; Nikolopoulou y Lycoudis, 2006

Según la Real Academia Española, la “adaptación” para un ser vivo significa acomodarse a las condiciones de su entorno. Según Nikolopoulou (2003), es la respuesta gradual de un organismo sometido a una exposición repetida de un estímulo, involucrando todas las acciones aptas para mejorar la supervivencia en un ambiente. El hombre reacciona a las condiciones ambientales de forma involuntaria (fisiológica) o consciente (controlada) y, en algunos casos, eso depende de la percepción personal y subjetiva de la sensación de confort (Cena y Clark, 1981;

González Neila, 2011). Así, para mantener su estado térmico, el hombre puede recurrir a la llamada adaptación fisiológica y a modificaciones de comportamiento que van desde desplazarse al sol o a la sombra, a usar sistemas de aislamiento como la vestimenta o climatizar el espacio.

En la actualidad, a la hora de realizar un análisis de un espacio exterior, el elemento de estudio más usado para estudiar la morfología urbana es el cañón. Un cañón es el volumen de aire contenido entre dos edificios opuestos y hasta la altura de las cubiertas de los edificios. Entender el flujo energético y radiactivo del cañón es fundamental para estudiar el comportamiento climático del entorno urbano.

La geometría del cañón se describe normalmente por dos elementos: la relación entre altura (H) y distancia entre los edificios (W) y el factor de cielo visible, que es la medida de la exposición del espacio urbano a la radiación solar directa. Los rangos del cociente H/W están determinados para cada zona y sus necesidades por las Ordenanzas Bioclimáticas. No existe un valor óptimo del mismo para todas las aplicaciones.

Estudios realizados en climas áridos han demostrado que, en cañones profundos, donde la radiación entrante es muy baja, se crean oasis de frío mejorando las condiciones de confort para los ocupantes de ese espacio.

De la misma manera, el viento juega un papel fundamental en la regulación de las condiciones de confort en exteriores: se puede estudiar la geometría urbana de forma que se creen corredores de ventilación que permitan la disipación del calor y el enfriamiento nocturno.

A pesar de los indudables avances que se han producido en la generación de nuevos indicadores de confort térmico para espacios interiores, en los abiertos no se ha alcanzado un acuerdo sobre la definición de un índice único (Johansson, 2006). Eso se debe, en primer lugar, a algunas diferencias sustanciales en las condiciones de partida (Höppe, 2002; Jendritzky, de Dear y Havenith, 2012), como: el tiempo de exposición, normalmente inferior al de los espacios interiores, la actividad física desarrollada y el nivel de arropamiento (Irina Tumini, 2015).

2.4 Recursos

2.4.1 Revisión de herramientas de cálculo

ENVImet

Es un programa de simulación climática que permite representar en un entorno un determinado espacio, del cual permite obtener distintas magnitudes en los puntos que interesen, como la radiación en diversas formas, la velocidad del viento, la temperatura superficial...

Posee varias bases de datos desde donde es posible crear y modificar elementos que vayan a incorporarse al espacio y que intervengan en los balances de energía realizados, como la vegetación o el suelo.

Es de interfaz sencilla con una clara misión: obtener unos archivos de salida que permitirán representar las distintas magnitudes obtenidas. Estos archivos serán leídos por programas de representación gráfica que mostrarán una salida más visual de la situación simulada.

Los dos archivos de entrada principales se presentan en los siguientes formatos:

- .in: es un archivo que describe el caso en un formato concreto
- .cf: es un archivo de configuración

Tiene la posibilidad de incluir dos tipos de elementos para transmitir o recibir información desde el entorno definido en el plano:

- Fuentes (sources): ENVImet ofrece la opción de incluir fuentes de partículas (PM) o gases inertes en el dominio del modelo.

Para calcular la dispersión de estas partículas y gases, realiza los siguientes procesos:

- Cálculo del volumen de emisiones basado en valores únicos de 24 horas.
- Sedimentación de partículas dependiendo del tamaño y peso.
- Deposición de PM y gases en superficies sólidas (techo, superficies de tierra, agua).

- Receptores (receptors): los receptores son puntos que permiten recolectar datos para los puntos seleccionados en el layout del modelo de una manera

compacta sin navegar a través de varios archivos para encontrar la información requerida.

Para cada receptor, se crea una carpeta distinta que contendrá la información en ese punto relativa a propiedades atmosféricas, propiedades del suelo y flujo radiante en su superficie. Cada receptor almacenará unos archivos con esta información y lo hará según el intervalo que se le indique en el perfil principal de configuración. En el caso en estudio se ha considerado guardar estos datos cada hora.

Todos los receptores tienen las mismas dimensiones, $dx*dy*dz$, definidas en el archivo in; tienen forma cúbica, de manera que se establecerán los distintos balances a través de las ocho caras del cubo.

Leonardo

Se trata de un programa de representación gráfica de datos, ligado a EnviMet y capaz de interpretar archivos EDT y EDI. Aunque ofrece una amplia variedad de modos de representaciones, no tiene buena resolución para superficies pequeñas del layout. Para las representaciones se utilizará Plotly, un programa de acceso libre de representación de datos, disponible gratuitamente en la web.

3. Casos de Estudio

3.1 Metodología

Para llevar a cabo el análisis climático en los distintos escenarios que se plantearán se ha elaborado una metodología tal que permita distinguir con claridad la problemática presente en el espacio, así como observar la mejora en términos de habitabilidad que supone el uso de los recursos y medidas propuestas, recogidos en el apartado 5 del presente documento.

La manera de proceder para alcanzar el objetivo descrito ha sido la siguiente:

En primer lugar, se procede a la representación del caso inicial (incluyendo obstáculos y vegetación), completando el layout en ENVI met. Tras ejecutar el modelo en la simulación, se obtienen los archivos EDI y EDT con los que, en una primera aproximación, es posible obtener una representación en el plano de las distintas magnitudes (campo de velocidad de viento, temperatura, radiación...). A través de la herramienta Simthesys se convertirá el contenido de estos archivos a un lenguaje que permite exportarlos a Excel. Una vez en este formato será posible utilizar un programa mejor para la representación de los parámetros: Plotly.

Estas representaciones gráficas permitirán tomar una serie de decisiones para alcanzar mayor grado de confort térmico en el espacio, de forma que se propondrá un escenario alternativo que volverá a ser representado.

El diagrama representado a continuación pretende dar una idea más clara sobre el proceder del método.

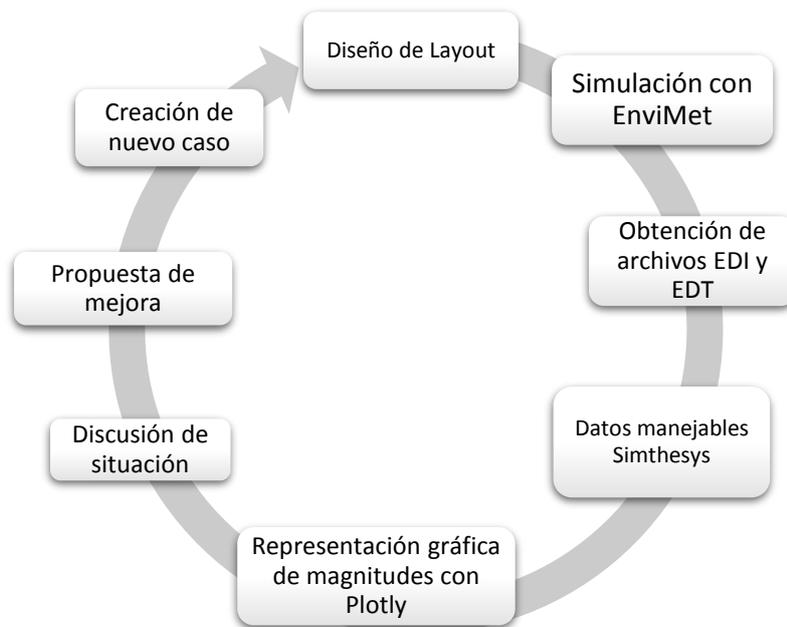


Imagen 3. Esquema sobre la metodología de trabajo

3.2 Emplazamiento

El control climático se ha realizado en las zonas exteriores ubicadas en el Colegio de Enseñanza Pública “Concepción Estevarena”, con dirección en la Avenida de la Ciudad de Chiva número 10, en Sevilla, dentro del distrito Este-Alcosa-Torreblanca. En la imagen 1 se señala la localización exacta dentro del conjunto de la ciudad.

Se encuentra en un área comercial, con un entorno formado por edificios de uso residencial de 5 o 6 alturas y edificios comerciales de no más de dos alturas.

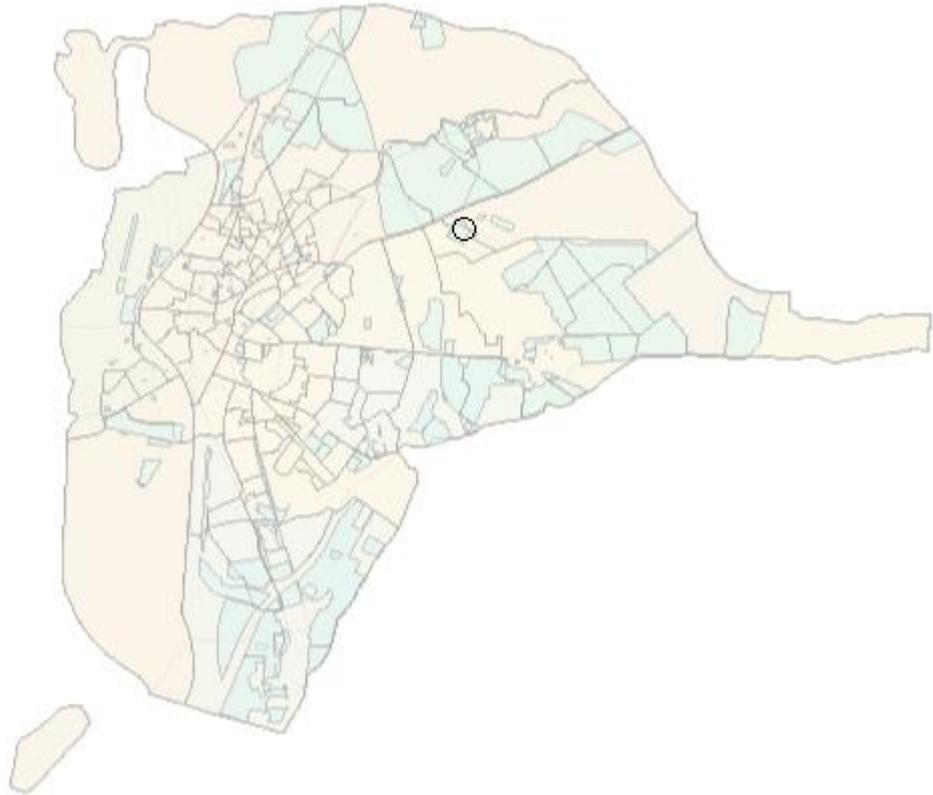


Imagen 4. Localización del espacio público en estudio

3.3 Descripción del espacio

La parcela, de $6500 m^2$ (80 x 82 m), orientada ligeramente al Este respecto a la dirección Norte, junto con los espacios exteriores, también alberga las siguientes edificaciones:

- Un edificio principal con dos alturas
- Un edificio secundario de una altura que conecta con el principal a través de una pasarela a ras de suelo
- Un gimnasio
- Una nave-almacén
- Un local de contadores e instalaciones
- Dos pistas polideportivas

El espacio en estudio se trata del patio exterior ubicado al este de la parcela, numerado con el 2, entre el edificio secundario y la parcela colindante derecha. Está rodeado por vegetación de densidad media al Norte y por vegetación de densidad baja en el lado derecho. Cuenta con una superficie de $460 m^2$ (18 m x 26 m) aproximadamente.

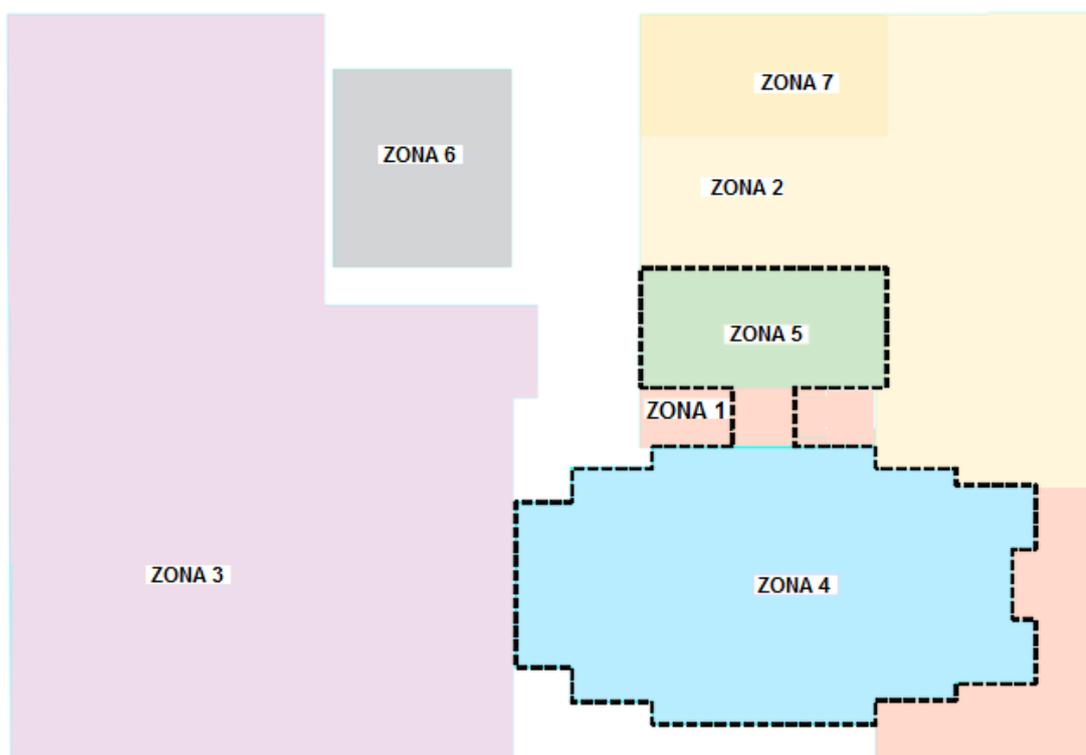


Imagen 5. Disposición de las zonas en el CEIP Concepción Estevarena

En la tabla adjunta se describen cada una de las zonas numeradas en la vista aérea del colegio:

Zona	Descripción
1	Pasarela entre edificios
2	Espacio en estudio
3	Pistas polideportivas y espacio polivalente
4	Edificio principal
5	Edificio uso administrativo
6	Gimnasio
7	Contadores e instalaciones

Tabla 3. Resumen de zonas

3.4 Definición inicial de parámetros

3.4.1 Configuración del dominio

Para poder hacer una simulación fiel a la realidad a través de ENVI met son necesarios diversos datos de entrada y archivos de configuración. Tal y como relata el punto anterior, el caso a simular se configurará mediante el archivo de configuración con extensión .in.

Además, en el menú principal se accederá a un cuadro de diálogo para configurar diversos parámetros del dominio y alguna de sus propiedades. Se definirá una malla o grid de 40*40 volúmenes de control en el plano XY, con una altura de 30 volúmenes. Con la entrada de estos datos queda definido el volumen de trabajo que confinará los obstáculos y en el que se estudiarán los distintos fenómenos.

El número de nesting grids sobre el área principal será nulo, para facilitar en el futuro los cálculos. Este número representa las particiones que el programa realiza automáticamente sobre el área de ocupación predefinida.

Por defecto, se seleccionará un suelo del tipo “loamy soil”, suelo arcilloso, para aquellas zonas en las que no se especifique un tipo de suelo concreto.

Change or create model Domain

Number of grids and nesting properties

Main model area:

x-Grids: 40 y-Grids: 40 z-Grids: 30

Nesting grids around main area:

Nr of nesting grids: 0

Soil profile ID for nesting grids

Soil A: I <Loamy Soil>

Soil B: I <Loamy Soil>

Grid size and structure in main area

Size of grid cell in meter:

dx= 2.00 dy= 2.00 dz= 2.00 (base height)

Method of vertical grid generation:

equidistant (all dz are equal except lowest grid box)

telescoping (dz increases with height)

Telescoping factor (%): 0

Start telescoping after height (m): 0.00

Geographic Properties

Model rotation out of grid north: 21.3

Location on earth

Name of location: Seville/Spain

Position on earth:

Latitude (deg. +N, -S): 37.24

Longitude (deg. -W, +E): -5.59

Reference time zone:

Name: CET/GMT+1

Reference longitude: 15.00

Georeference

Co-ordinate of lower right grid

x-value: 0.00

y-value: 0.00

Reference system: <plane>

Model area description: A brave new area

Create new area

Apply changes

Cancel

Imagen 6. Panel de configuración inicial en EnviMet

En cuanto a los volúmenes diferenciales en los que se dividirá el espacio, seleccionaremos uno de dimensiones 2*2*2 (size of grid cell). Será el volumen a partir del cual se realizarán los balances de masa y de temperatura de forma discreta, como ya se ha comentado en el punto anterior.

Para definir las propiedades geográficas se selecciona la ubicación del espacio que trataremos, y se calcula la rotación del mismo respecto a la dirección Norte, siendo de 21.3°.

Del mismo modo en que puede configurarse el dominio a través de este menú, puede hacerse abriendo el archivo de configuración e introduciendo los datos a mano, siendo este el resultado.

```
% Name of reference time zone
CET/GMT+1
% Definition longitude of time zone
15.00
% Define where area data are located
[INTERNAL]

% Soil Profile ID for Nesting Grid A
sd
% Soil Profile ID for Nesting Grid B
sd
% Geographical Projection System
GK
% Real world coordinate lower left grid x and y
0.00
0.00
% Name of location (city,..)
Seville/Spain
% Model description
A brave new area
% Number of grids in x, y and z direction
40
41
20
% Base Horizontal Gridsize dx, dy
2.00
2.00
% Vertical Gridsize
2.00
% Telecoping vertical Grid? 0= No 1= Yes
1
% Telecoping factor in %
0
% Start z-level for telecoping
0.00
% Model rotation out of grid north in deg
21.3
% Number of nesting grids
0
```

[Imagen 7](#). Código inicial de configuración del dominio en EnviMe

3.4.2. Periodo de simulación

La simulación de los casos, que más adelante se desarrollarán, tendrá lugar en los meses de verano, dado que es el espacio de tiempo en el que el espacio queda infrautilizado. Además, sólo se realizará durante el día, teniendo en cuenta que las seis primeras horas de simulación no vierten resultados fiables (tal y como indica el desarrollador de ENVImet); es por eso por lo que se considerará un periodo de simulación con las siguientes características:

- Simulación del día 15 de los meses de junio, julio, agosto y septiembre, aunque poniendo especial interés en junio, único mes estival en que se utiliza el espacio de forma intensiva.
- Hora de comienzo de simulación a las 11 horas
- Hora de fin de simulación, 18:00 horas.
- Registro de datos del modelo cada dos horas

3.4.3 Suelos

El programa solicita también la rugosidad del suelo a una altura de $z=0$. Para dar un valor fiable del mismo se recurrirá a la norma UNE EN ISO 15927-1 de 2006 *Comportamiento higrotérmico de edificios-Cálculo y presentación de datos climáticos*.

El coeficiente de rugosidad explica la variabilidad de velocidades del viento medias en un lugar debida a:

- La altura sobre el suelo
- La rugosidad del terreno dependiendo de la dirección que lleve el viento

El coeficiente de rugosidad a una altura genérica z está dado por la siguiente expresión:

$$Cr = Kr * \ln \frac{z}{z_0} \text{ para } z > z_{min}$$

$$Cr = Kr * \ln \frac{z_{min}}{z_0} \text{ para } z < z_{min}$$

Donde,

Kr es el factor del terreno

Z0 es la altura de la rugosidad

Zmin es la altura mínima

Concretando para el patio exterior en estudio, y teniendo en cuenta la composición y características de su suelo, puede considerarse un terreno de categoría IV según la tabla proporcionada por la norma.

Categoría del terreno	K_R	z_0	z_{min}
I Alta mar arbolada; orilla de lago con al menos una zona de acción del viento de 5 km y terreno plano y liso sin obstáculos	0,17	0,01	2
II Terreno de granja con setos divisorios, estructuras agrícolas pequeñas, casas y árboles aislados	0,19	0,05	4
III Zonas suburbanas o industriales y bosques permanentes	0,22	0,3	8
IV Zonas urbanas en las que la menos el 15% de la superficie está cubierta por edificios de una altura media superior a 15 m.	0,24	1	16

Tabla 4. Propiedades del terreno según categoría

El factor del terreno tomará un valor de 0.24 y dado que la altura a la que interesa la rugosidad es altura cero (a ras de suelo), se tiene un coeficiente de rugosidad de 0.24.

El pavimento que se ha escogido para el caso de estudio ha sido un suelo tipo “sandy” o arenoso. Se extiende por toda la superficie del espacio exterior. Sus características las recoge la siguiente tabla:

ID	V	ns	nfc	nwilt	matpot	hydr	CP	b	Hcn	Name
Sd	0	0.395	0.135	0.0068	-0.121	176.0	1.463	4.05	0.00	Sandy

Tabla 5. Propiedades del suelo arenoso seleccionado

Donde,

ID: el identificador de dos dígitos que vincula los suelos con los datos del perfil en PROFILES.DAT, base de datos que se modificará posteriormente.

V: Tipo de suelo 0: suelo normal, 1: material de sellado (sin intercambio de agua), 2: agua profunda

Ns: Contenido volumétrico de agua a saturación en [m³m⁻³]

Nfc: Contenido volumétrico de agua a la capacidad de campo en [m³m⁻³]

Nwilt: Contenido volumétrico de agua en el punto de marchitamiento (para el modelo de vegetación) en [m³m⁻³]

Matpot Matrix: Potencial de saturación en [m]

Hydr: Conductividad hidráulica a saturación en [ms⁻¹] * 10⁻⁶

CP: Capacidad Volumétrica de Calor en $[Jm^{-3}K^{-1}] * 10^6$

B: Constante de Clapp & Hornberger

HCN: Conductividad térmica del material en $[Wm^{-1}K^{-1}]$

En la siguiente imagen puede apreciarse los distintos tipos de suelos seleccionados para el modelo. Como ya se mencionó en el apartado de configuración del dominio, se ha escogido por defecto un suelo tipo “loamy”, representado por la letra I, y un pavimento para los alrededores del patio exterior, representado en el layout con la P.

ENVImet requiere este dato de entrada para poder determinar los perfiles de temperatura y humedad en el suelo y superficies del modelo.

3.4.4. Datos climáticos

Los parámetros de entrada al programa que quedan por definir son el viento y la temperatura de la atmósfera.

Los datos de viento y temperatura del aire siguientes se han extraído de [una base de datos](#) correspondiente a una estación situada en el municipio de La Rinconada (Sevilla) para el año 2012, a pocos kilómetros de distancia del espacio en estudio y que, por ello, refleja con mucha exactitud las condiciones climatológicas del mismo.

La siguiente grafica muestra una evolución diaria de la temperatura del aire en Sevilla en los meses de interés:

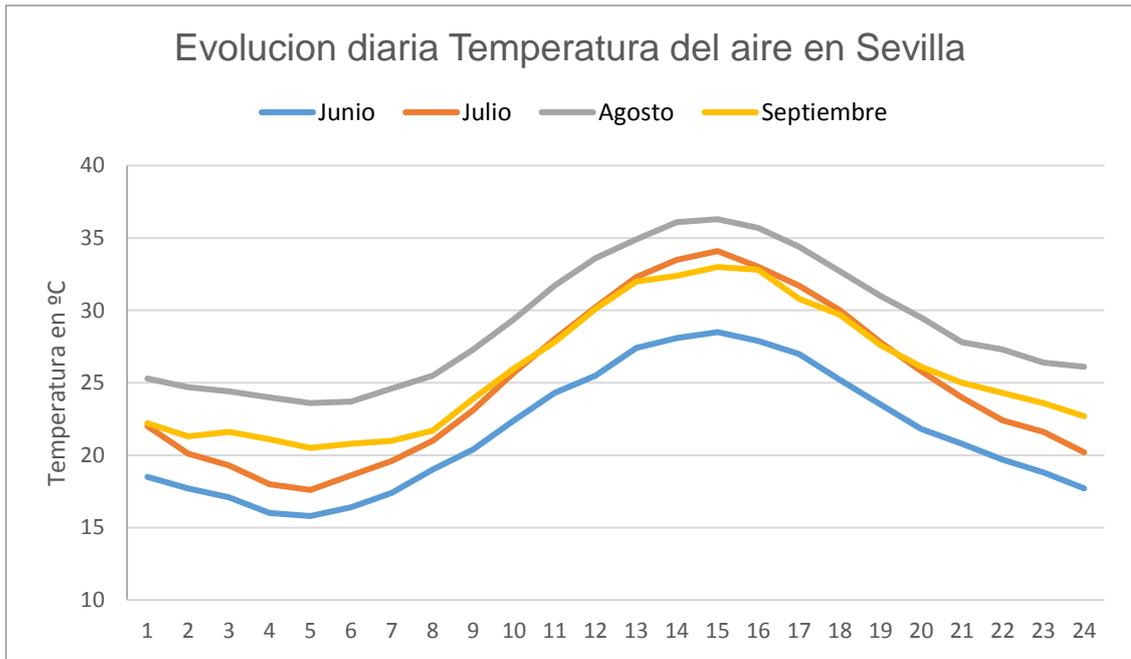


Imagen 8. Evolución temperatura diaria en Sevilla en los meses de junio, julio, agosto y septiembre.

De entre los datos que proporciona esta fuente sobre velocidad de viento, se ha decidido tomar las velocidades correspondientes al percentil 85, para que haya una mayor fiabilidad sobre la velocidad del viento sin importar el día en concreto que se quiera estudiar. Teniendo esto en cuenta, en la tabla adjunta se distinguen los valores obtenidos:

Mes	Velocidad viento (m/s)	Dirección predominante
Junio	2.46	Suroeste
Julio	2.72	Suroeste
Agosto	2.62	Suroeste
Septiembre	3.24	Suroeste

Tabla 6. Parámetros medios mensuales

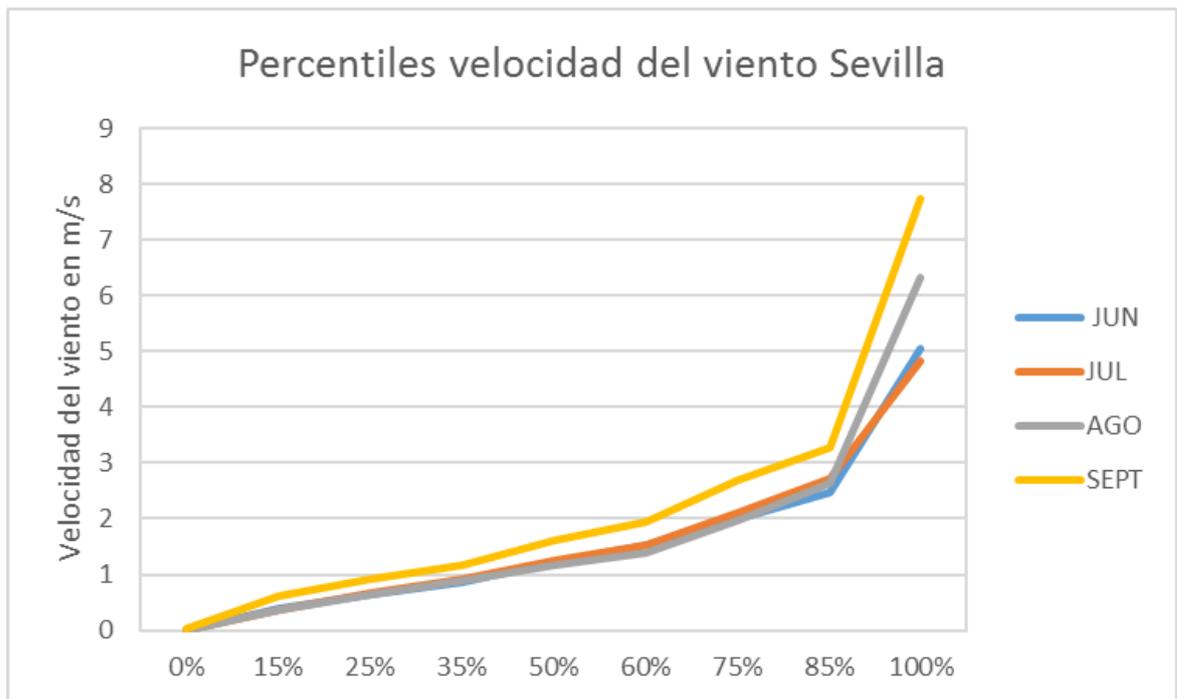


Imagen 9. Percentiles de velocidad del viento en Sevilla para los meses de junio, julio, agosto y septiembre.

Por su parte, la estación meteorológica situada en el Aeropuerto de Sevilla proporciona los siguientes datos sobre la dirección del viento predominante en un año completo, reunidos en las gráficas adjuntas. Son valores históricos referidos a un año de referencia, y actualizados cada día. Puede observarse que la tendencia es dirección suroeste y noreste, más típica en los meses de invierno en la capital hispalense.

Distribución de la dirección del viento en (%)
Año

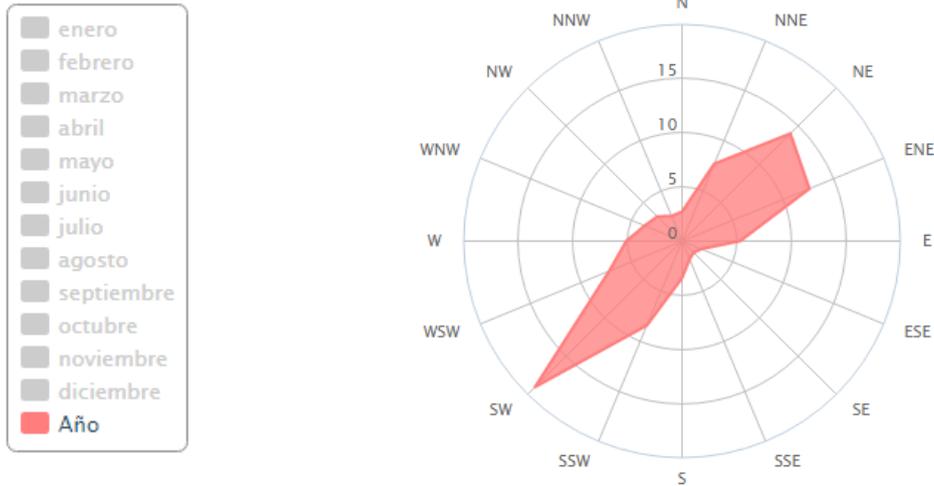


Imagen 10. Dirección del viento predominante anual en Sevilla

Por otra parte, se observa que para el mes de referencia tomado (junio), el viento sopla en dirección predominantemente suroeste.

Distribución de la dirección del viento en (%)
junio

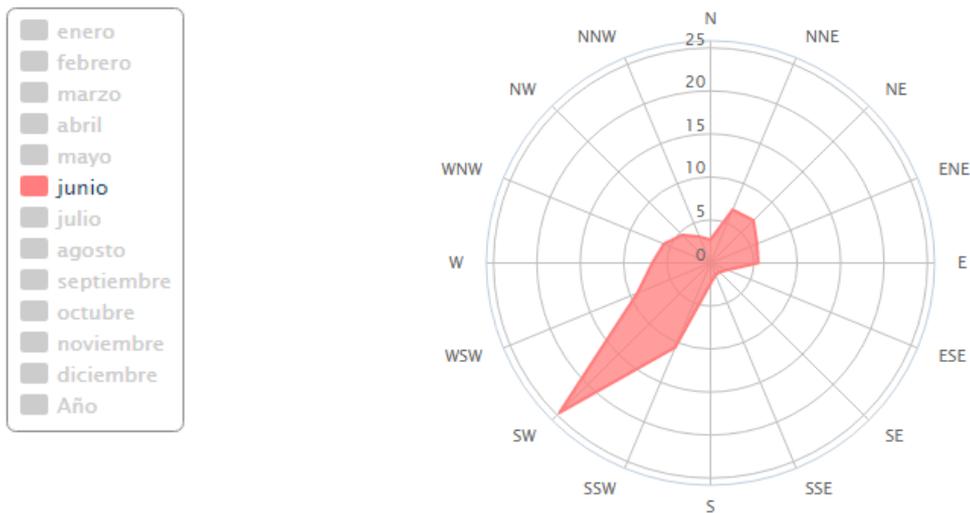


Imagen 11. Dirección del viento predominante en el mes de junio en Sevilla.

El último paso antes de comenzar la simulación será indicarle al programa los parámetros anteriores de viento y temperatura, a través del archivo.cf.

Como puede apreciarse en el código, existe un campo relativo a la humedad existente a 2500 m sobre el plano de trabajo. En nuestro caso lo obviaremos debido a que los valores de humedad a esa altitud no afectan en gran medida a los cálculos.

3.6 Escenario sin obstáculos

Como se ha explicado en puntos anteriores, el programa ENVImet permite simular el entorno del espacio a través de determinados archivos de entrada, que sirven para configurar el caso en concreto.

Se considerará como caso de referencia, denotado como escenario sin obstáculos, al espacio de trabajo aislado en un entorno sin obstáculos como edificios o vegetación y expuesto a las condiciones climáticas reales de viento y temperatura.

El modelo sobre ENVImet que se ha trazado para este caso se muestra en la imagen adjunta; un único espacio exterior con las condiciones del entorno fijadas. Pueden apreciarse las distintas composiciones de suelo del espacio en estudio (arenoso para el patio y sin datos para el exterior del mismo), y que se han omitido todos los elementos del entorno circundantes.

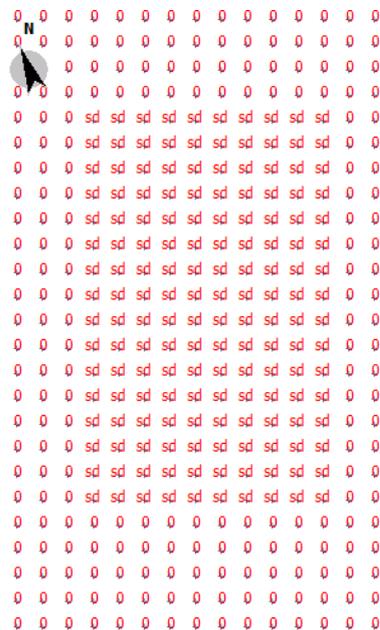


Imagen 12. Apariencia del espacio en la configuración del suelo

Debido a ello, el campo de velocidades de aire toma una forma distinta respecto al caso de referencia.

La razón de ser de este primer caso es visualizar el efecto que tiene sobre el espacio en estudio la presencia de obstáculos y cómo modifican el campo de velocidades del viento, radiación y temperatura.

3.7 Escenario real

Se considerará como caso inicial, denotado como escenario B, al espacio en estudio (patio principal) ubicado en su entorno real, incluyendo todos los obstáculos como construcciones y vegetación, teniendo en cuenta su disposición y características térmicas. En suma, la representación del caso inicial será aquella que incluya parte de la parcela del colegio que rodea al patio, omitiendo los obstáculos que no influyan directamente sobre las condiciones climatológicas del espacio, es decir, se omitirán los edificios y vegetación que no supongan un obstáculo en las corrientes de aire que llegan al patio, teniendo en cuenta la dirección que toma el viento.

A diferencia del escenario A, en este caso sí se van a considerar receptores en distintos puntos alrededor del espacio en estudio. La localización de los mismos está reflejada en el código del archivo .in.

El layout del espacio con el que se simulará este caso inicial es el que se presenta a continuación. Para llevarlo a cabo se han especificado los siguientes parámetros:

- Altura de los edificios
- Composición del suelo
- Características y ubicación de la vegetación
- Distancia entre los distintos obstáculos

Es necesario mencionar en este punto las decisiones que se han tomado para simplificar esta representación, intentando en todo momento que no se vean afectadas las corrientes de aire y flujos de calor sobre el patio exterior.

En primer lugar, se ha omitido el edificio de una altura situado al norte del patio exterior, utilizado como sala de contadores e instalaciones, pues no interfiere en los flujos de viento procedentes del suroeste.

Por otro lado, existe un edificio de cinco alturas situado al este del patio exterior, que se ha representado como un muro de dos metros de grosor y veinte de altura; el hecho de aumentar el grosor del mismo no influye sobre las corrientes, ya que éstas sólo “ven” la cara oeste del mismo.

Aunque podría haberse simplificado la representación, se ha optado por seguir una que fuera fiel a la realidad, para poder obtener resultados más acordes con la situación real.

Como ya se ha comentado, en este caso inicial es necesario tener información de masas de aire, flujos de calor y propiedades atmosféricas en distintos puntos, para lo que se utilizarán receptores descritos en la imagen de abajo.

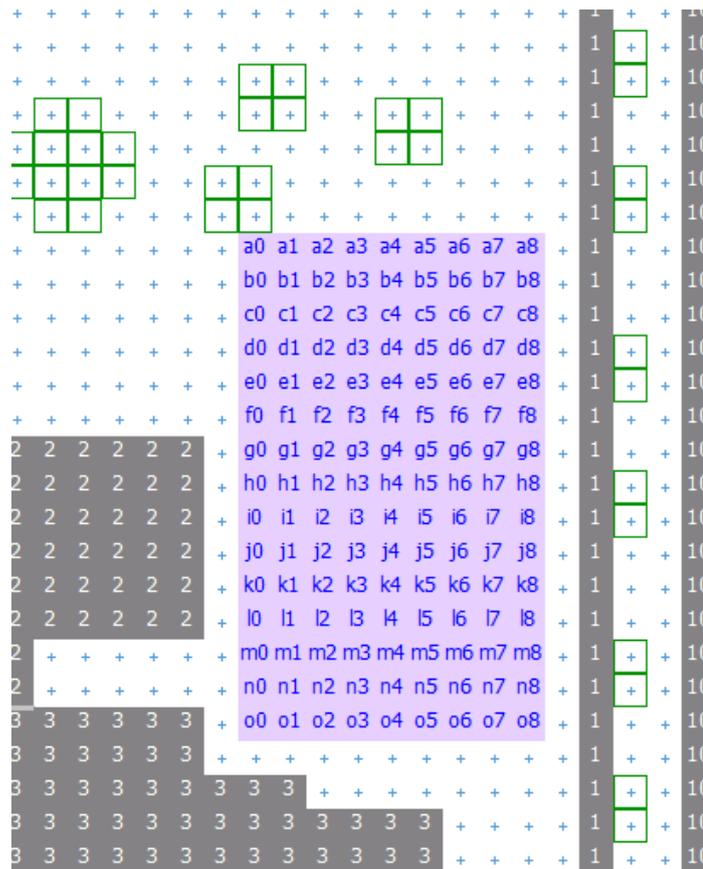


Imagen 13. Localización de los receptores en el espacio de interés con obstáculos.

Será sobre este último escenario sobre el que se propondrán distintas soluciones constructivas para aumentar los niveles de confort en el patio. Todas las gráficas de aquí en adelante harán referencia única y exclusivamente al patio, a toda el área que encuadran los receptores.

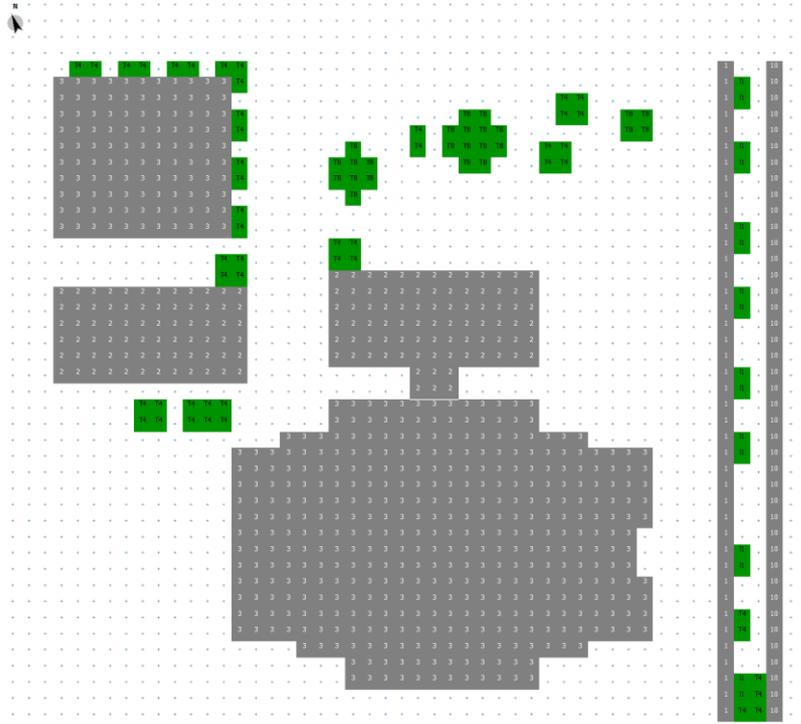


Imagen 14. Apariencia del layout del caso inicial representado en EnviMet

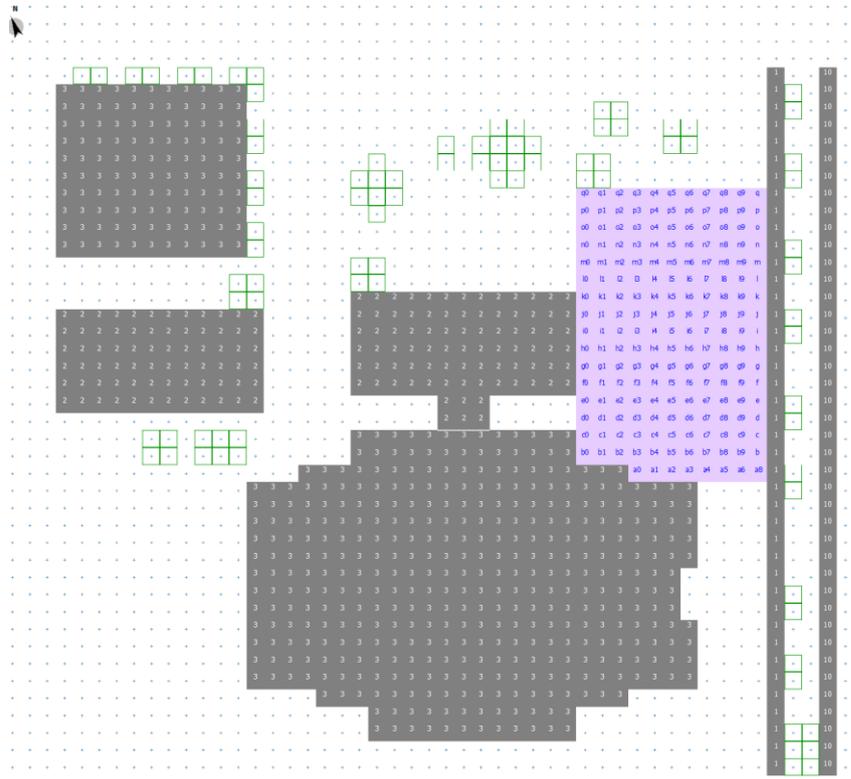


Imagen 15. Apariencia del layout del caso inicial con receptores representado en EnviMet

3.7.1 Campo de viento

El campo vectorial de velocidades de viento en el patio del escenario real se caracteriza por tener una dirección predominante sursuroeste; se ve la cara influencia de los edificios

circundantes comparado con el campo vectorial en el escenario sin obstáculos. El valor medio de la velocidad del viento también se ha visto alterada por la razón anterior. Como día de referencia se tomará para todos los casos el 15 de junio de 2008 a las 12:00, con las condiciones reales que tuvieron lugar ese día, ya que el objetivo es ver el efecto de las distintas configuraciones de apantallamiento sobre el campo de velocidades del viento.

Se aprecia claramente como en la parte más sur del espacio en estudio, el módulo de la velocidad queda reducido prácticamente a la mitad respecto a los puntos norte del patio debido a la presencia del edificio adyacente.

Puede afirmarse que las únicas construcciones que alteran su dirección son el edificio 4 y el 4. El centro del patio permanece inalterable a la presencia de los edificios circundantes en términos de dirección de viento respecto al caso sin obstáculos de ninguna clase.

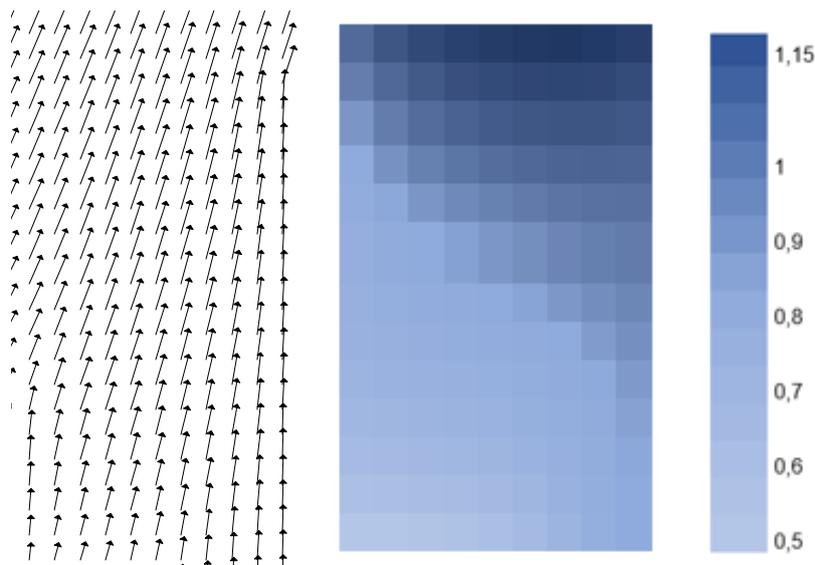


Imagen 16. Dirección y módulo del viento en m/s en caso inicial

3.7.2 Campo de temperatura

En cuanto a las condiciones de temperaturas en este caso inicial, se tienen 30 grados centígrados (330 K) en todo el patio. Estas condiciones se han tomado del cálculo de un día representativo del mes de junio, extraído de los datos climáticos. De estos datos, además, se extrae directamente la conclusión de que las condiciones de confort en el espacio, en este escenario B, no son idóneas. Este asunto se discutirá más en profundidad en el punto 5 de esta memoria.

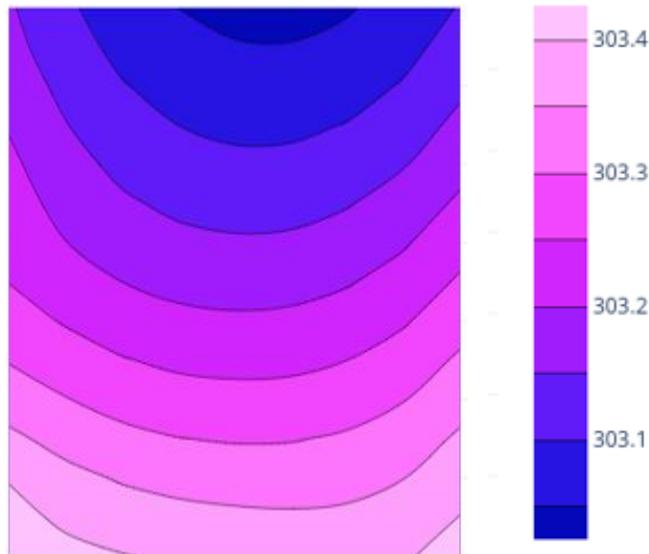


Imagen 17. Campo de temperatura en el patio, escala en °K

4. Medidas de mejora

Para elevar los niveles de confort en la zona exterior ocupada se va a recurrir a tres tipos de mejoras: el confinamiento de corrientes de aire en el espacio, o apantallamiento de corrientes de aire, el uso de coberturas como elemento de sombra y el enfriamiento evaporativo.

Para cada caso se irá viendo el efecto que tienen estas medidas de mejora del confort en este espacio exterior, tanto independientemente como combinadas, tal y como se explica en el punto 5 de esta memoria.

4.1 Confinamiento del espacio

En el estado original del espacio exterior, existe la distribución de corrientes de aire mostrada en la imagen 10.

Para ver el efecto que el confinamiento tiene sobre el escenario B, se han decidido emplear las configuraciones que se muestran a continuación, y simularlas seguidamente con EnviMet

Como día de referencia se ha tomado un 15 de junio de 2008 con las condiciones reales, ya que el objetivo es ver el efecto de las distintas configuraciones de apantallamiento sobre el campo de velocidades del viento.

Seguidamente, y como se ha venido haciendo con anterioridad, el archivo EDT se ha introducido en Leonardo para poder obtener una representación gráfica de este campo.

Tras introducir este elemento constructivo en EnviMet, y exportar los datos vectoriales de viento a Leonardo, se obtienen los siguientes resultados comparados con el caso inicial de estudio (apartado 3.7.1 de esta memoria).

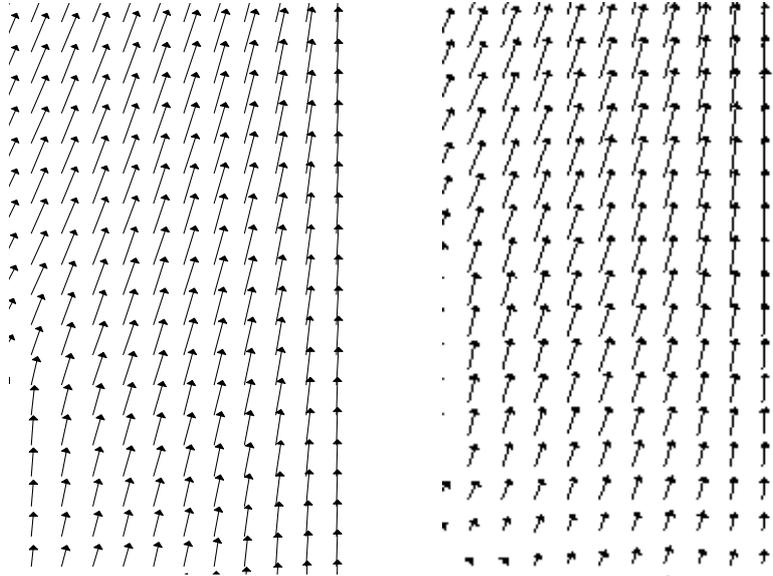


Imagen 18. Comparación de campo de dirección del viento entre caso inicial (izquierda) y caso de confinamiento 1 (derecha)

Se aprecia cómo, debido a la presencia de esta barrera, la dirección del viento en las zonas próximas se ve ligeramente alterada, pasando de dirección sur a dirección suroeste. De igual manera, el módulo de la velocidad se verá en decremento, como se observa en la siguiente comparación.

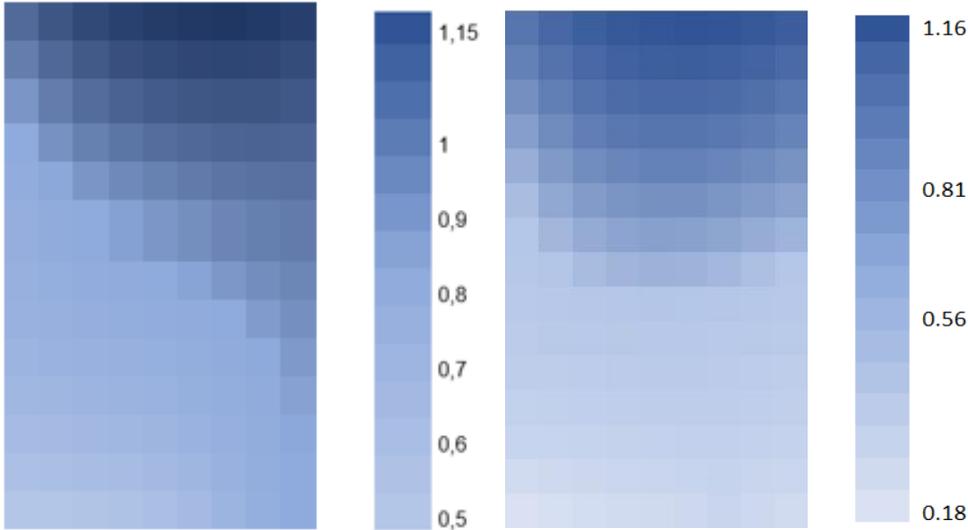


Imagen 18. Comparación del módulo del viento entre caso inicial (izquierda) y caso de confinamiento 1 (derecha)

La velocidad del viento se ve reducida a más de la mitad de su valor inicial en las zonas próximas a la barrera de confinamiento y prácticamente se mantiene igual en la mitad superior de la zona de estudio.

4.1.2 Estrategia de confinamiento 2

En la siguiente estrategia de confinamiento, se ha optado por utilizar una barrera de 10 metros de altura colocada justo encima del edificio de uso administrativo– para comprobar cómo afecta su presencia al campo de velocidades el viento en el patio.

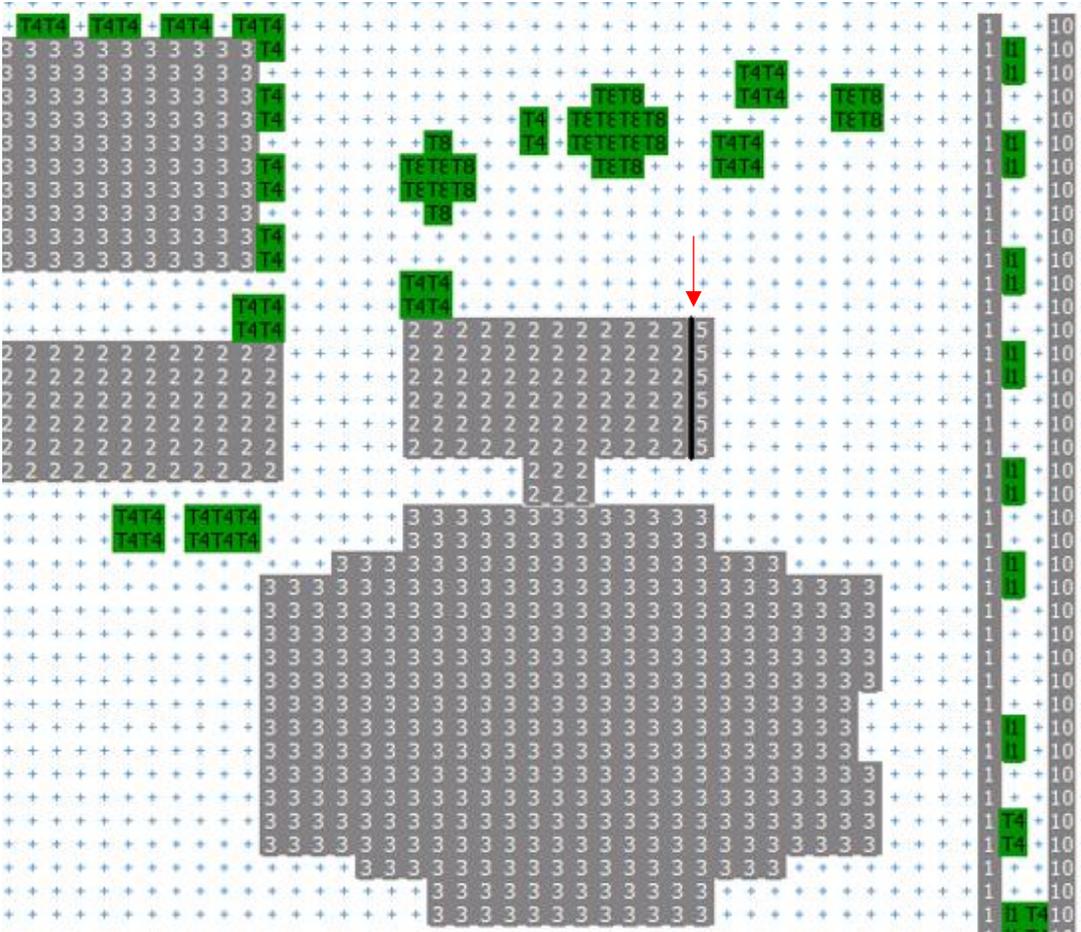


Imagen 20. Layout caso de confinamiento 2

En este caso, la barrera de confinamiento tiene poco efecto sobre la dirección del viento en la mayoría de la superficie del patio. Se puede apreciar un cambio en la zona suroeste del patio en estudio, donde el viento pasa a soplar del sur a soplar del oeste- suroeste.

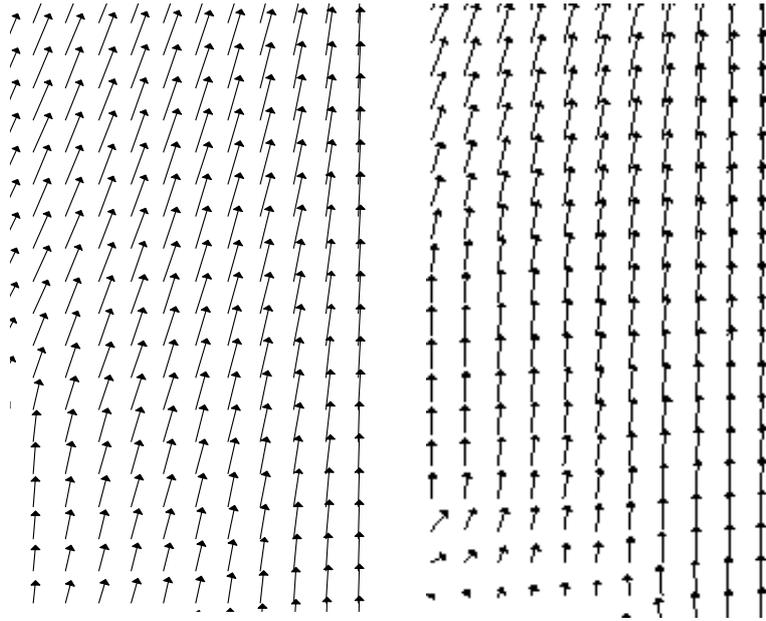


Imagen 21. Comparación de la dirección del viento entre caso inicial (izquierda) y caso de confinamiento 1 (derecha)

El módulo de la velocidad para esta barrera no cambia prácticamente en la mitad inferior del patio, aunque se aprecia una clara influencia sobre la parte oeste, en la cual sufre un decremento del 45-50 %. A grandes rasgos, se puede afirmar que esta estrategia de confinamiento no ejercerá mucha influencia sobre las condiciones de confort en el patio.

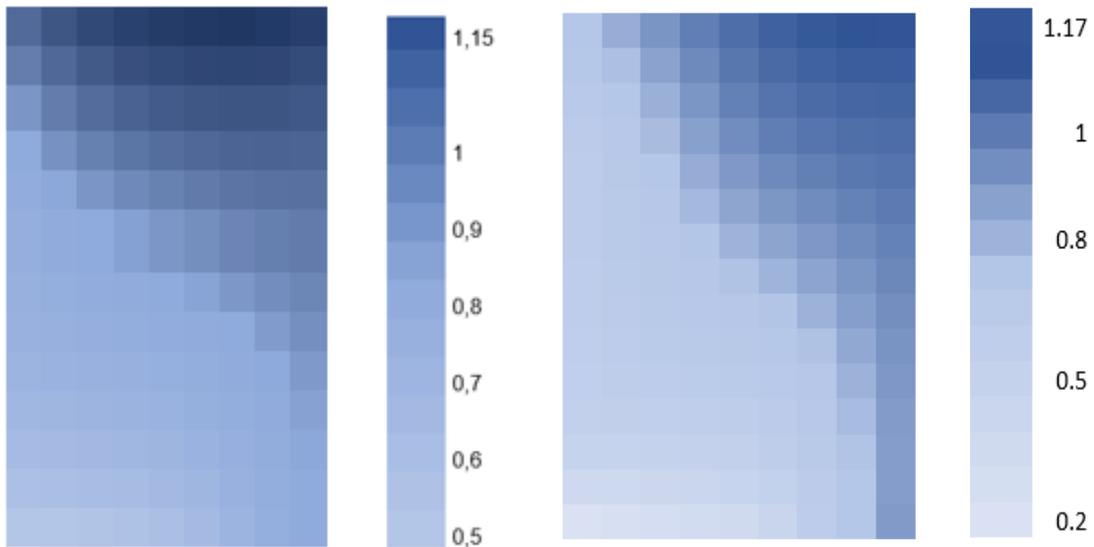


Imagen 22. Comparación del módulo del viento entre caso inicial (izquierda) y caso de confinamiento 2 (derecha).

4.1.3 Estrategia de confinamiento 3

La última estrategia de confinamiento en estudio se trata de una doble barrera; una pantalla de seis metros ubicada al noroeste del edificio principal, la cual posee una orientación suroeste, justamente para poder abarcar las corrientes de aire procedentes de esta dirección, y una barrera, de la misma altura una longitud de 50 metros, situada en la parte sur de toda la parcela del colegio. Esta última barrera sería contigua a una barrera ya existente de dos metros, que sirve de separación entre esta parcela y la vía pública.

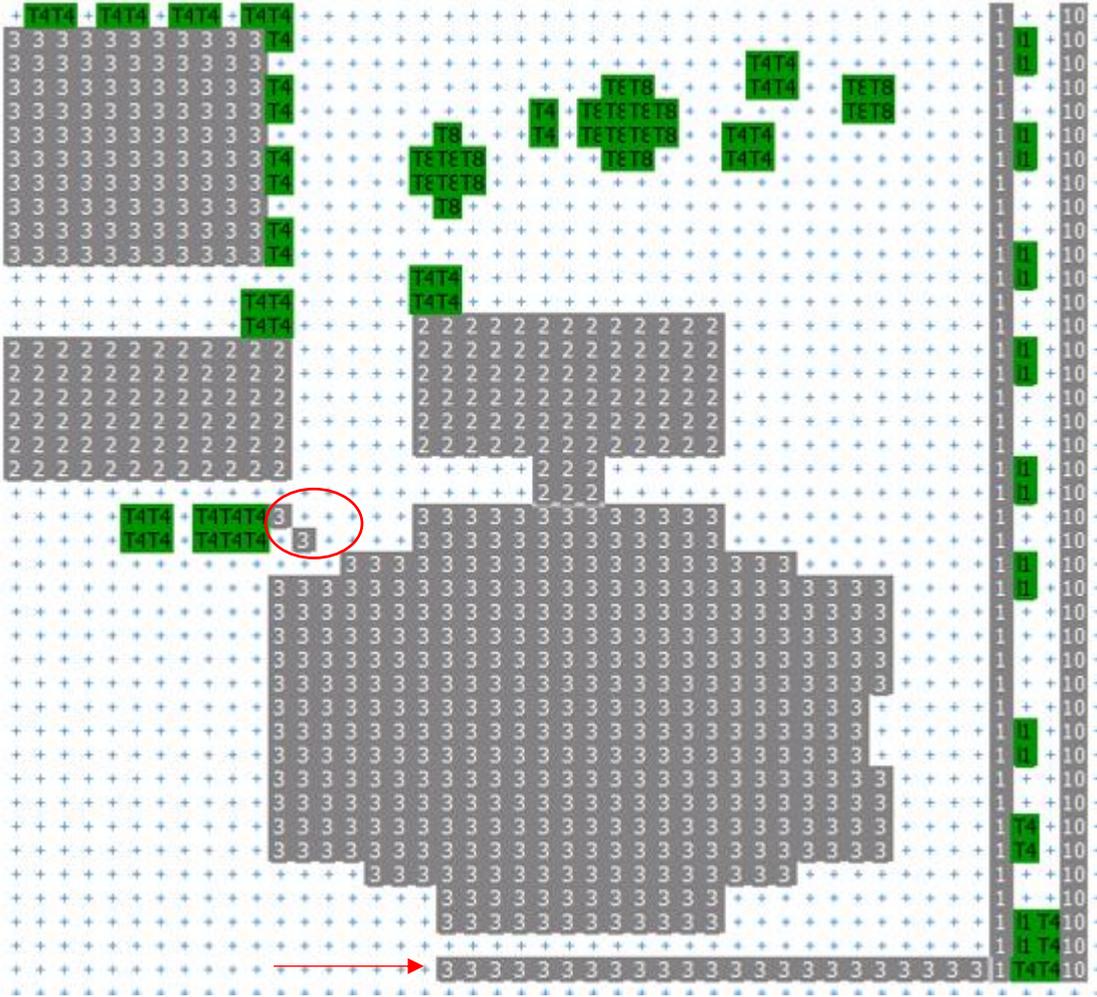


Imagen 23. Layout con barrera para caso de confinamiento 3

Con esta configuración de confinamiento, la dirección del viento no se ve muy alterada en términos generales; predomina una componente suroeste como en el caso inicial sin barreras. Sin embargo, estas graficas obtenidas con Leonardo dejan ver que el módulo cambia considerablemente.

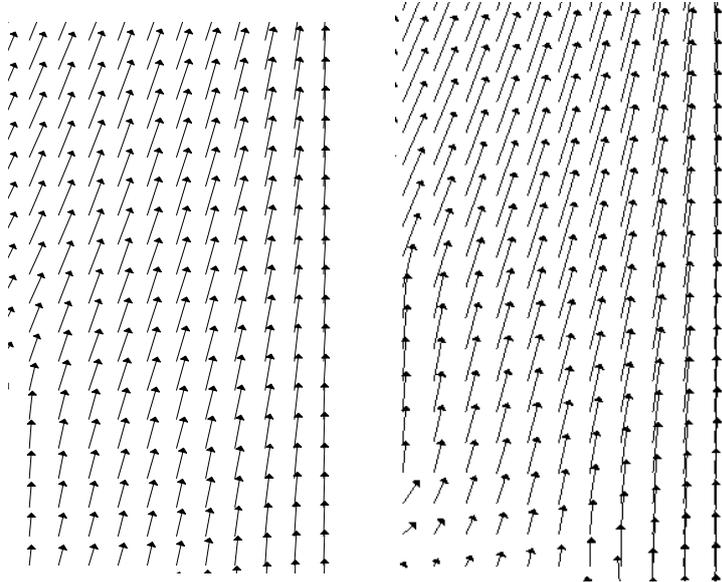


Imagen 24. Comparación de la dirección del viento entre caso inicial (izquierda) y caso de confinamiento 1 (derecha)

En efecto, se observa objetivamente un aumento de la velocidad del viento, siendo más evidente en la parte central del patio. Comparando este caso con el caso inicial sin barrera, las velocidades en la parte superior se mantienen, o incrementan ligeramente, mientras que, en la parte central, se pasa de valores de 0.7 a 0.85/0.9 m/s.

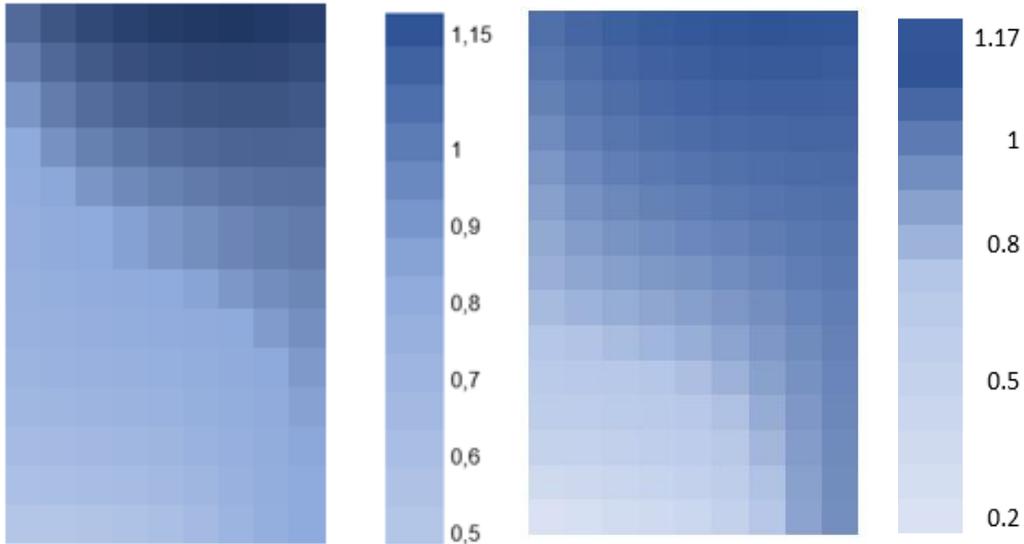


Imagen 25. Comparación del módulo del viento entre caso inicial (izquierda) y caso de confinamiento 2 (derecha).

El movimiento del aire aumenta la disipación de energía por evaporación o convección, siempre que la temperatura de la piel sea inferior a la del aire. No obstante, cuando las temperaturas son superiores a 40°C, el viento aumenta la sensación de calor. Dado que las temperaturas del aire se mantienen por debajo de este valor, puede afirmarse que el caso 3 de confinamiento resulta más favorable en términos de confort.

4.2 Coberturas

Para proyectar sombra sobre el espacio exterior ocupado se ha decidido utilizar cubiertas de distintas propiedades radiantes, situadas a seis metros de altura aprovechando la altura del edificio adyacente.

En total se van a estudiar cuatro casos independientes, entre los que distinguimos una cubierta vegetal y tres coberturas hechas de otros materiales, cuyas propiedades (absortividad, transmisividad y reflectividad) por este orden se muestran en la tabla adjunta.

	α	τ	ρ
Cob 1	0,3	0,1	0,6
Cob 2	0.2	0,15	0,65
Cob 3	0,1	0,3	0,6
Cob 4	0,3	0,25	0,45

Tabla 7. Propiedades ópticas de las cubiertas solares

La cobertura 1 corresponde a una cobertura opaca, con baja transmisividad, pero alta capacidad de reflexión.

La cobertura 2 se trata de una cubierta vegetal, de transmisividad típicamente 0.15. Dadas las propiedades reflectantes de las hojas, este tipo de cubierta suele tener un valor elevado para la reflectividad. (F. Baret, 1994)

Se observa también que la reflectividad de una planta depende de su contenido en agua. Cuando el contenido de agua aumenta disminuye la reflectividad ya que aumenta la absorción de radiación por parte del agua contenida en la planta.

La vegetación sana tiene una reflectividad baja en el visible, aunque con un pico en el color verde debido a la clorofila. En cuanto a la absortividad, para la vegetación suele tener valores altos, aunque disminuye en longitudes de ondas en el espectro visible, tal y como muestra la gráfica siguiente, donde PAR denota la longitud de onda de espectro visible.

Por todo lo anterior, se escogerá una vegetación con poco contenido en agua (por lo que la hoja absorberá menos energía), y con un tipo de hoja caducifolia, para que el ciclo de foliación se adecúe a los niveles elevados de radiación térmica en verano (Vaughan, 2012).

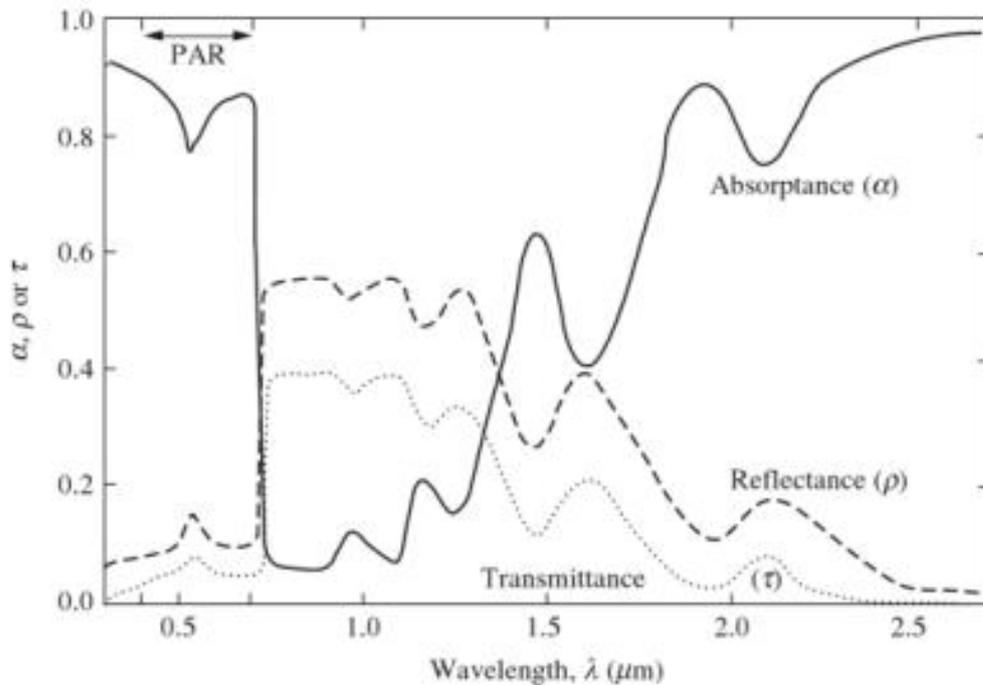


Imagen 26. Absortividad de las hojas en el espectro de luz

La **cobertura 3** se caracteriza por tener similares absorptividad y reflectividad. Por sus propiedades, se podría decir que se trata de un toldo estándar de colores oscuros.

Por último, la **cobertura número 4** corresponde a una cobertura de propiedades similares a la anterior, pero de color más claro debido a una menor absorptividad.

La mayor parte de los sólidos con los que se trabaja en ingeniería y arquitectura son *cuerpos opacos* a la radiación, es decir, poseen una transmisividad tan baja que puede considerarse nula frente a la absorptividad y reflectividad.

4.2.1 Modelo de cálculo para elemento de sombra

Dado que, ni EnviMet, ni ninguna otra herramienta a nuestra disposición permite simular estas situaciones, se ha recurrido a un modelo matemático para hallar las distintas temperaturas que se alcanzan en las coberturas.

Este modelo va a consistir en el planteamiento de varios balances de energía:

- Un balance para la situación del patio con cubierta en términos de radiación absorbida por la cubierta (balance del cual se obtendrá la temperatura de la cubierta),
- Un balance en términos de temperatura radiante media en el caso del patio sin cubierta, el cual permite conocer la Temperatura radiante media ponderada de las superficies que rodean al patio
- Un balance en términos de temperatura radiante media en el caso del patio con cubierta del que finalmente se obtendrá la Temperatura radiante media que vería un sujeto situado en ese entorno.

4.2.2 Cálculo de temperatura de cobertura

La temperatura de cobertura es aquella que alcanzará la cobertura en un momento dado, considerando unas propiedades radiantes determinadas. Para su cálculo será necesario establecer un balance en términos de energía entre la radiación incidente (radiación directa y difusa), el aire exterior, las superficies circundantes (paredes de los edificios y vegetación) y la cobertura. Cuando la radiación incide en la cobertura, parte de la misma es absorbida y el calor se transfiere hacia el patio, las paredes de los edificios adyacentes y la vegetación. La imagen siguiente representa los flujos de transferencia en el espacio, distinguiéndose la cubierta y el suelo como superficies horizontales y las paredes adyacentes al espacio exterior como superficies verticales.

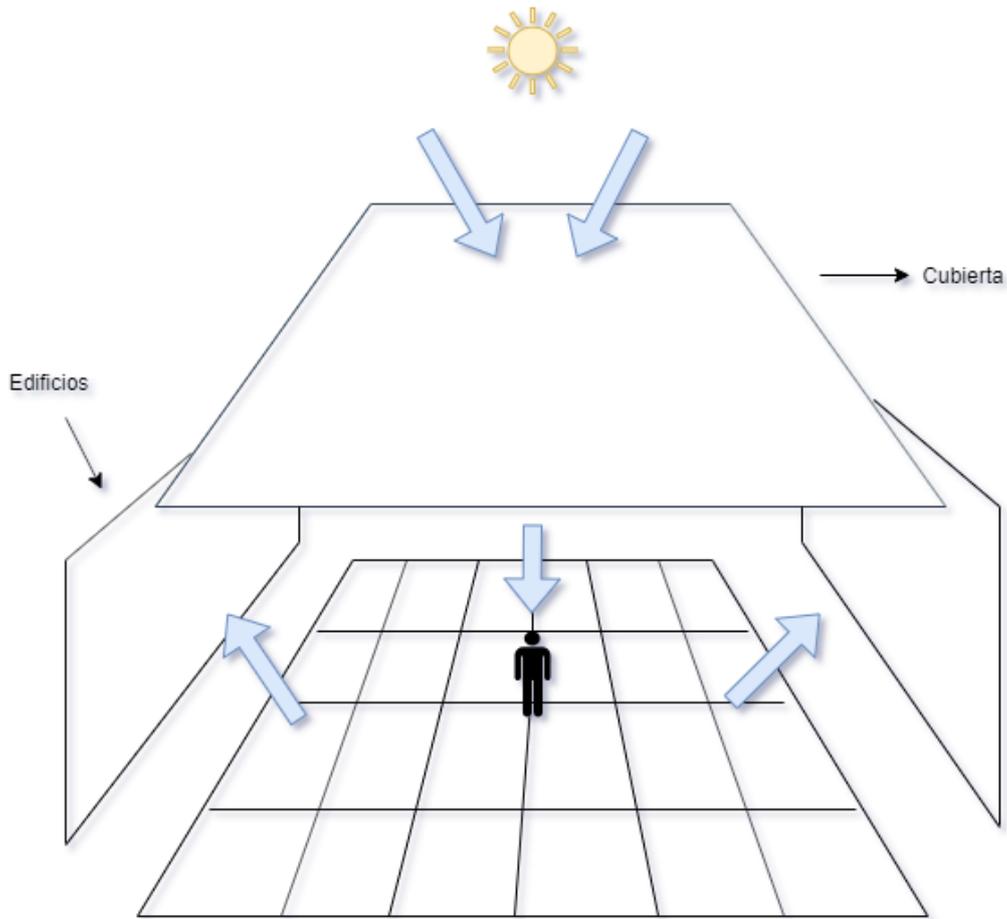


Imagen 27. Intercambios radiantes y convectivos del sujeto situado en el patio con cobertura solar

La ecuación que gobierna este mecanismo de transferencia radiante y convectiva es la que se muestra a continuación,

$$\tau[R_D + R_d] = h_{radiante_{exterior}}(T_{cob} - T_{cielo}) + h_{convectivo}(T_{cob} - T_{aire}) + F_{cob-suelo} * h_{radiante}(T_{cob} - T_{suelo}) + F_{cob-pared} * h_{radiante}(T_{cob} - T_{pared})$$

donde,

$h_{radiante}$ es el coeficiente de transferencia de calor por radiación

$h_{radiante_{exterior}}$ es el coeficiente de transferencia de calor por radiación exterior existente entre la cubierta y la bóveda celeste

$h_{convectivo}$ es el coeficiente de película convectivo

FF_{cober_suelo} es el factor de forma de la cubierta con el suelo

FF_{cober_pared} es el factor de forma de la cubierta con las superficies circundantes

$R_{directa}$ es el valor de la radiación directa en W/m^2 para día despejado

R_difusa es el valor de la radiación difusa en W/m^2 para día despejado
T_pared es la temperatura en K de las superficies circundantes al patio
T_cielo es la temperatura de cielo para el día y la hora en estudio expresada en K
T_suelo es la temperatura en superficie del suelo del patio expresada en K
T_aire es la temperatura media del aire en K considerada para el día simulado
T es la transmisividad de la cubierta

Para todos los tipos de cubierta, para la transferencia radiante se considerará un coeficiente de radiación de 4.5 vatios por metro cuadrado, mientras que para los procesos de transferencia de calor por convección se tomará un coeficiente convectivo de 10 vatios por metro cuadrado.

En la expresión anterior para determinar la temperatura de cobertura, existen dos términos que hace falta calcular. Se trata del factor de forma de la cobertura con el suelo, $F_{cob-suelo}$, y de la cobertura con las superficies circundantes, $F_{cob-pared}$.

Un factor de forma se define como la fracción de energía radiante total que abandona la superficie 1, y llega directamente a una segunda superficie 2, considerando como superficie emisora a la cobertura, y como superficie receptora al suelo, dado que sólo se va a calcular el factor de forma $F_{cob-suelo}$.

Realmente, y si se analiza el espacio, se puede afirmar que sabiendo el factor de forma de la cobertura con el suelo, el factor de forma de la cobertura con las superficies circundantes resulta directo según esta expresión:

$$F_{cob-suelo} = 1 - F_{cob-pared}$$

Es directo afirmar que son valores complementarios, así que bastará con calcular el más sencillo de ellos, que en este caso es el factor de forma de la cobertura con el suelo, dado que se trata de dos planos paralelos con un área limitada. Para hallarlo, se va a hacer uso de las tablas de factores de forma para figuras geométricas sencillas.

Las entradas a la gráfica son, por un lado, el cociente entre el ancho del patio (15,3 metros) y a altura a la que se encuentra instalada la cobertura, y por otro lado, el cociente entre el largo del patio (23,4 metros) y la altura anterior. Dado que la cobertura está situada a 6 metros sobre el nivel del suelo, se tiene que el factor de forma de la cobertura con el suelo es de 0,55.

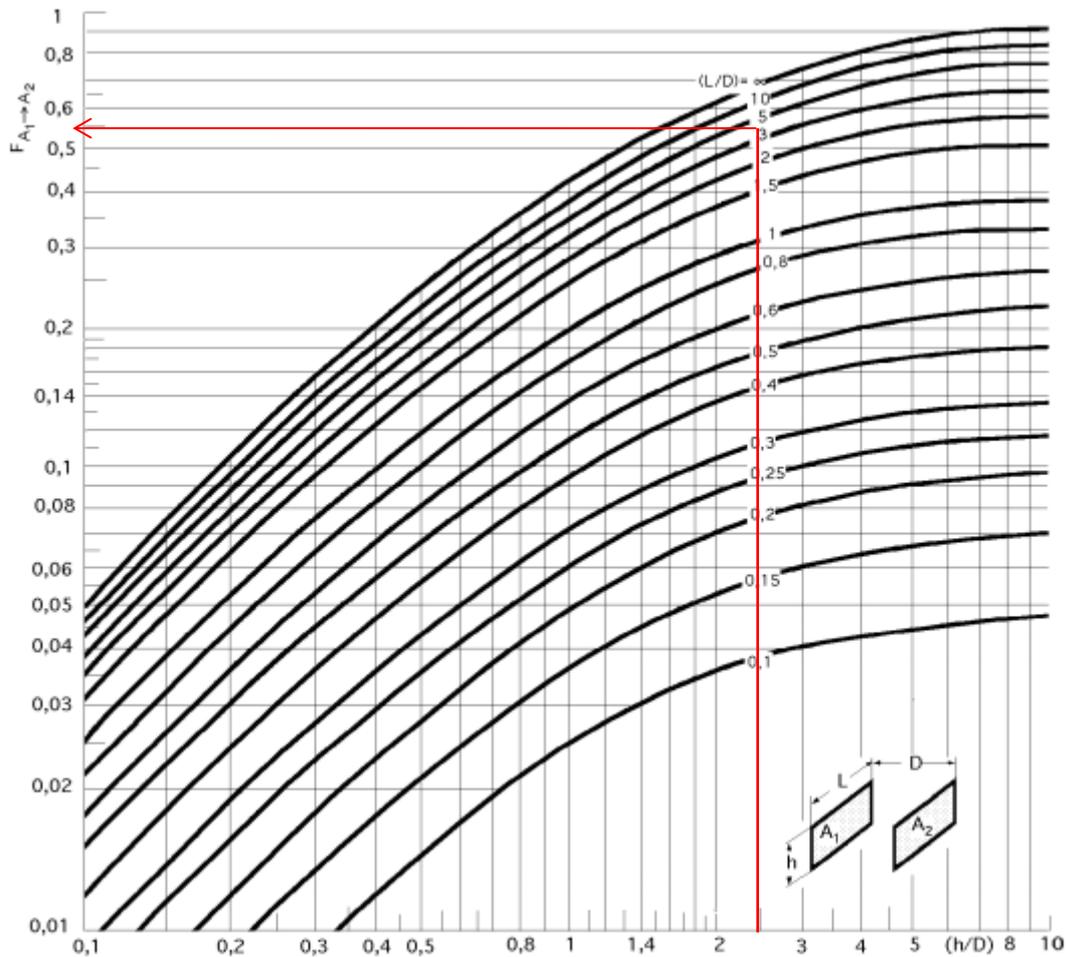


Imagen 28. Gráfica factor de forma planos paralelos

4.2.3 Cálculo temperatura radiante

Para la definición en el espacio en estudio de la temperatura radiante media, se supondrá que el sujeto que se encuentra en el patio recibe radiación de la cubierta, y de los elementos circundantes en toda su superficie (véase modelo de confort en el punto 3).

Se define temperatura radiante media de un espacio como aquella temperatura uniforme de las superficies circundantes con la cual la transferencia de calor por radiación desde o hacia una persona situada en el interior del mismo, fuera la misma que se produce en la situación actual con las temperaturas superficiales reales.

Es una de las variables que más contribuyen a la sensación de confort en un espacio, junto con el nivel de actividad, la vestimenta, la temperatura seca, la humedad relativa y la velocidad del aire, según la guía NPT 74 sobre confort térmico del Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo.

Para el cálculo de esta magnitud se va a proceder del siguiente modo:

1. Se puede afirmar que la Temperatura radiante total (que es la que recibirá un sujeto expuesto en el patio **sin cubierta**) es la suma de las temperaturas radiantes de los elementos circundantes ponderadas por sus propias Temperaturas radiantes según la expresión,

$$T_{radiante_{total}} = \Sigma T_{radiante_{elemento}} * FF_{elemento}$$

2. Por otro lado, el último término de la expresión anterior puede expresarse como:

$$\Sigma T_{radiante_{elemento}} * FF_{elemento} = FF_{cielo} * T_{cielo} + FF_{resto} * T_{resto}$$

Donde $FF_{resto} * T_{resto}$ expresa el producto entre el Factor de forma de los elementos que rodean al sujeto, exceptuando el cielo, y su temperatura radiante. Este término no será necesario calcularlo independientemente pues es la única incógnita en la ecuación, ya que la Temperatura radiante total se obtiene de los resultados aportados por EnviMet para la simulación en concreto.

3. Una vez se introduce la cubierta como una restricción en el problema, la ecuación para obtener la temperatura radiante toma la siguiente forma:

$$T_{radiante_{cubierta}} = T_{cobertura} * FF_{cielo} + T_{resto} * FF_{resto}$$

Donde $T_{radiante_{cubierta}}$ es la temperatura que realmente ve el sujeto situado debajo de la cubierta, y es la única incógnita presente en la ecuación.

4.2.4 Cálculo temperaturas del suelo

La temperatura del suelo, T_{suelo} , se verá afectada por la colocación de las distintas cubiertas, ya que mitigará la radiación que incide sobre él, viéndose reducida considerablemente. La imagen siguiente representa la distribución de las temperaturas del suelo en la situación real (en ausencia de elementos de sombra) para el dominio completo. Puede observarse que las temperaturas que se alcanzan en la zona de interés oscilan entre los 28° C y los 33° C.

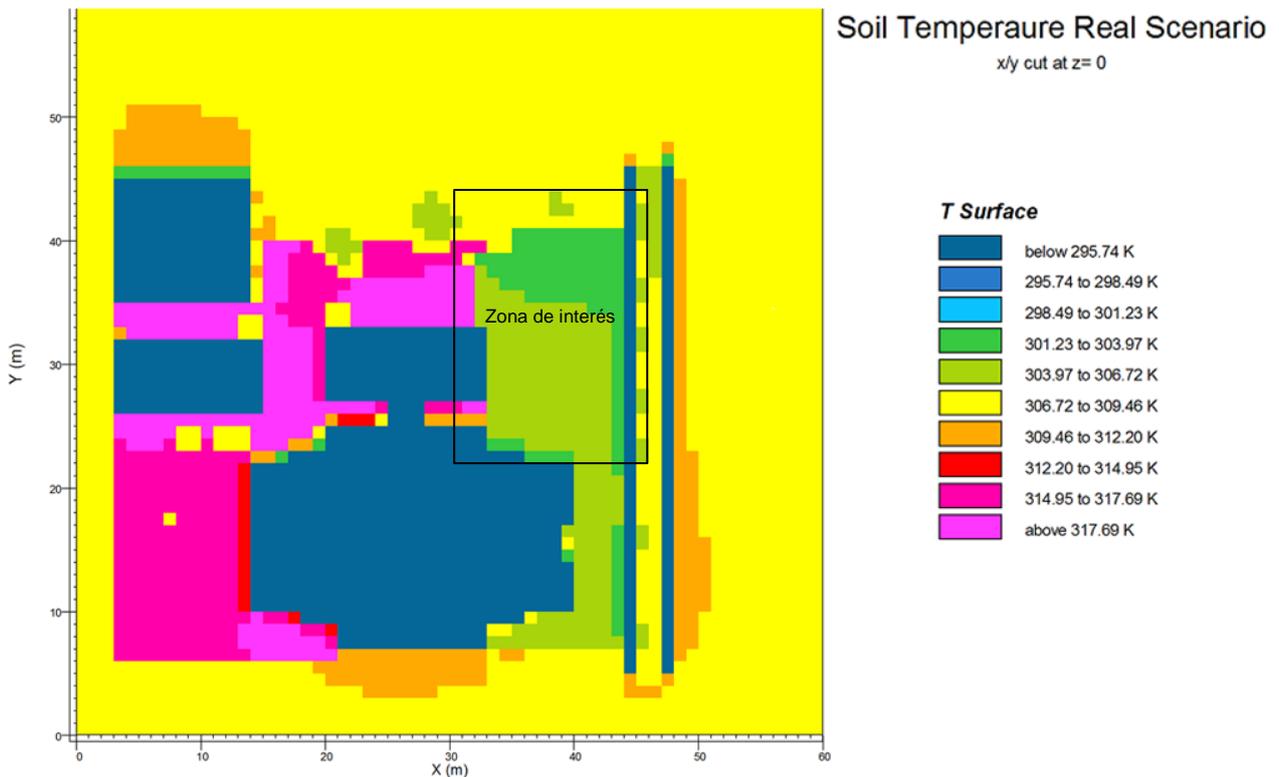


Imagen 29. Distribución de temperaturas de suelo en caso de referencia

Tras la instalación de la cobertura solar, el suelo absorberá una radiación inferior a la que absorbía en ausencia de cobertura, debido a la radiación que filtra ésta. La imagen siguiente refleja los intercambios de flujos calor en el suelo.

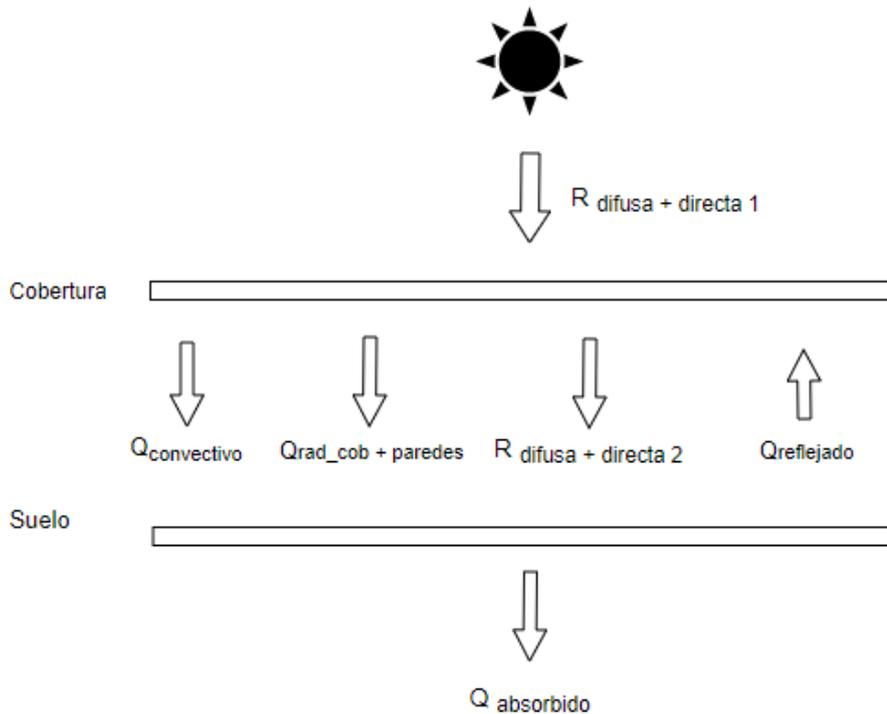


Imagen 30. Esquema flujos de calor en espacio con cobertura

Se distinguen los siguientes flujos de calor respecto al suelo:

- $Q_{convectivo}$: intercambio de calor por convección entre el suelo y el aire. Se considera que el aire siempre tendrá una mayor temperatura que el suelo
- $Q_{absorbido}$: de la radiación total que recibe, absorberá una proporción que depende de su absorptividad.
- $Q_{reflejado}$: el suelo reflejará una proporción de la radiación incidente, que viene determinada por una de sus propiedades ópticas, el albedo. Para este tipo de suelo arenoso, el albedo tomará un valor de 0.2. (Stull, 2000)
- $Q_{rad_{cob+paredes}}$: es la radiación que recibe por parte de la cobertura y de los edificios circundantes por el hecho de encontrarse a una temperatura mayor a la del suelo.
- $R_{difusa+directa\ 1}$: radiación solar incidente sobre la cobertura
- $R_{difusa+directa\ 2}$: radiación solar incidente sobre el suelo, con un valor menor al término anterior.

La ecuación que rige estos intercambios y que permitirá hallar la temperatura del suelo tras la instalación de la cubierta, viene dada por la siguiente expresión:

$$Q_{reflejado} + Q_{absorbido} = Q_{rad_{cob+paredes}} + Q_{convectivo}$$

Desarrollando los términos, se tiene:

$$\begin{aligned} \hat{\alpha} * \tau_{cobertura} * R_{difusa+directa} + \alpha * \tau_{cobertura} * R_{difusa+directa} \\ = h_{rad} * FF_{cob-suelo} * (T_{cob} - T_{suelo}) + h_{rad} * FF_{pared-suelo} \\ * (T_{pared} - T_{suelo}) + h_{conv} * (T_{aire} - T_{suelo}) \end{aligned}$$

Cuya única incógnita es T_{suelo} .

Se tomará un valor de 0.76 para la absortividad α , equivalente a un suelo arenoso.

4.3 Enfriamiento evaporativo

El enfriamiento en climas cálidos relativamente secos se puede conseguir mediante el enfriamiento evaporativo. Éste implica, o bien pulverizar agua líquida en el aire o bien forzarlo a circular a través de un tejido que se mantiene constantemente mojado con agua (Michael J Morgan, 1987). Como propuesta de mejora para el patio, en este Trabajo Fin de Máster se considerará la primera opción.

El enfriamiento evaporativo se produce de forma espontánea al entrar en contacto agua con aire el cual no está saturado de humedad. Este proceso da lugar a una transferencia de calor y masa. El aire no saturado se enfría, proporcionando el calor sensible que posteriormente va a convertirse en calor latente para producir la evaporación del agua. Este intercambio de calor tendría su fin cuando el aire se satura y ambas temperaturas se igualan, alcanzando la “temperatura de saturación adiabática” (y que es prácticamente igual a la temperatura húmeda del aire) (Energía, 2012). Existen límites al enfriamiento conseguido por la saturación adiabática. La cantidad de calor sensible eliminado no puede ser superior al calor latente necesario para saturar el aire. Las posibilidades de enfriamiento, por tanto, varían inversamente con el contenido en humedad del aire. Aire muy saturado de humedad, solo podrá ser enfriado de manera sensible por el intercambio de calor consecuencia de la diferencia de temperaturas aire/agua, no por el calor latente necesario para la evaporación del agua en aire.

Para calcular la reducción de temperatura de aire que supone la utilización del enfriamiento evaporativo, se va a proceder de la siguiente manera:

Para cada volumen independiente considerado en el patio (un volumen de 2 * 2 metros como se detalló en el punto 3.4.1), se establecerá un balance de entalpías de la mezcla formada por el aire que originalmente está en el patio, y el agua que se pulveriza. Se realizará la hipótesis que a cada volumen de 4 m³ le abastece un solo pulverizador.

Se supone que toda el agua inyectada se evapora en la corriente de aire húmedo. El aire inicial tendrá una entalpía que se calculará según la expresión:

$$\text{Entalpía}_{\text{aire}} = C_{p_{\text{aire}}} * T_{\text{aire inicial}} + w_{\text{específica aire inicial}} * (C_{p_{\text{vapor agua}}} * T_{\text{aire}} + Q_{\text{latente vap}})$$

Donde,

$\text{Entalpía}_{\text{aire}}$ es la entalpía del aire húmedo del patio originalmente

$C_{p_{\text{aire}}}$ es el calor específico del aire a 25 °C, con valor de 1 kJ/KgK

$C_{p_{\text{vapor agua}}}$ es el calor específico del vapor de agua, 1,86 kJ/KgK

$Q_{latente\ vap}$ es el calor latente de vaporización del agua a 0°C, 2500 kJ/kgK

Esta expresión se compone de la entalpía del aire seco, y de la entalpía del vapor de agua presente en él.

La temperatura a la que el agua del pulverizador entra en contacto con el aire del patio será, por simplicidad, próxima a su temperatura húmeda, por lo que será un proceso a entalpía constante.

La entalpía resultante de la mezcla, que permanecerá constante según se ha considerado será:

$$\begin{aligned} \text{Entalpía}_{aire} &= \text{Entalpía}_{mezcla} \\ &= C_{p_{aire}} * T_{mezcla} + w_{esp\ mezcla} * (C_{p_{vapor\ agua}} * T_{mezcla} + Q_{latente\ vap}) \end{aligned}$$

Para el cálculo de la temperatura resultante de la mezcla de aire y agua pulverizada, hay que decidir hasta qué humedad relativa se puede enfriar la mezcla, es decir, cuanto vapor de agua admitirá no alcanzando nunca el estado saturado. Se ha establecido un valor de un 70 % como humedad final de la mezcla.

La humedad específica resultante (kilogramos de agua por kilogramo de aire seco) vendrá expresada con la siguiente fórmula:

$$w_{final} = \frac{(h_{mezcla} - T_{mezcla})}{1,86 * T_{mezcla} + 2500}$$

La diferencia entre esta humedad final y la humedad específica que el aire del patio tenía originalmente, dará lugar al caudal de agua que hay que aportar para conseguir el enfriamiento, si tenemos en cuenta un área de paso de 4 metros cuadrados y una densidad del aire de $1,2 \text{ kg/m}^3$.

4.3.1 Estrategia de enfriamiento tipo 1

La primera estrategia de enfriamiento evaporativo que se propone es una línea de vaporizadores situada en la parte sur del patio como la imagen siguiente representa. Como ya se ha especificado, por cada volumen de estudio (2 m x 2 m x 2 m) habrá un vaporizador.

La ubicación de esta línea de vaporizadores es viable desde el punto de vista constructivo, pues puede situarse a una altura de 2,5 coincidiendo con la altura del edificio adyacente más próximo.

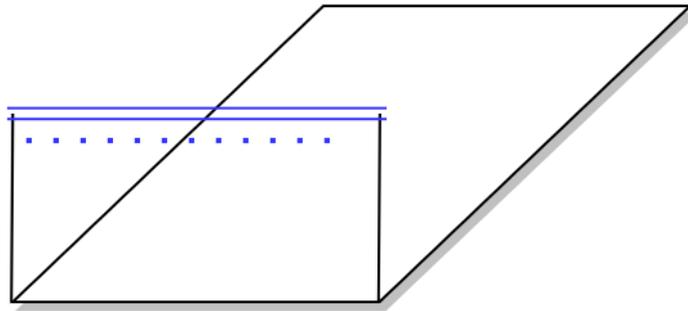


Imagen 31. Configuración enfriamiento evaporativo tipo 1

4.3.2 Estrategia de enfriamiento tipo 2

La segunda propuesta de enfriamiento evaporativo se trata en colocar una segunda línea de vaporizadores en la mitad del espacio de interés, de forma que se intensifique el enfriamiento del aire del patio y aumenten las condiciones de confort.

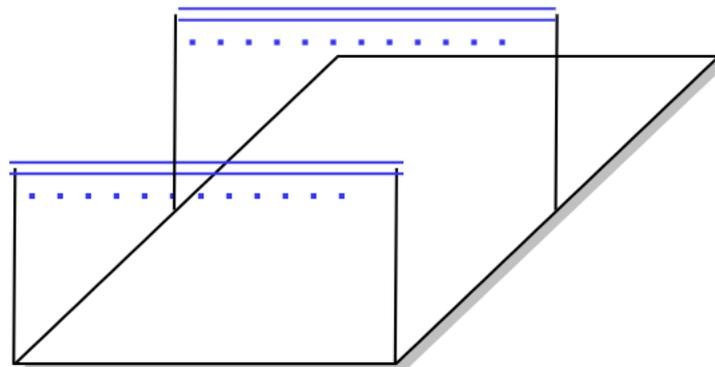


Imagen 32. Configuración enfriamiento evaporativo tipo 1

4.4 Índices de confort

4.4.1 Temperatura radiante media

Aplicada al problema que presenta este trabajo, la temperatura radiante depende de las temperaturas superficiales medias de las edificaciones que rodean a un individuo situado en el espacio en estudio. Este parámetro se puede definir como << [...] si todas las superficies de un entorno estuviesen uniformemente a la misma temperatura se produciría el mismo equilibrio de calor radiante net que el del entorno considerado con diversas temperaturas superficiales>>.

El cuerpo humano desprende aproximadamente del 30 % del calor corporal por radiación al ambiente. Si por efecto de la insolación solar, las superficies del local se calientan sobremanera, en relación con la temperatura del cuerpo humano, no solo el organismo no podrá desprender su calor con el ambiente, sino que recibirá un aporte adicional de calor por parte de las paredes.

4.4.2 Tasa de sudoración SW

Uno de los métodos más completos para la valoración del confort térmico es el índice o tasa de sudoración requerida, desarrollado por Vogt, Candas y Libert & Daull en 1981, y recogido en la norma ISO 7933, '*Ergonomics of the thermal environment – Analytical determination and interpretation of heat stress using calculation of the predicted heat strain*'

Este método compara diversas variables medidas en situación de sudoración, como son la humedad de la piel, la sudoración o la evaporación del sudor. Además, proporciona unos intervalos óptimos en los que el individuo se encontrará en confort térmico con el ambiente (Torada, 1995).

Para hallar este índice, se propone el método descrito en la Nota Técnica de Prevención número 350 del Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo de España, extraída en su mayor parte del contenido de la norma ISO 7933.

La metodología se basa en la comparación de los valores de dos variables, la humedad de la piel y la producción de sudor necesarias en unas determinadas condiciones de trabajo, frente a los valores fisiológicamente posibles de esas variables. La estimación de dichos valores se obtiene en el desarrollo de las siguientes etapas:

- Determinación de la evaporación requerida (E_{req}) para que se mantenga el equilibrio térmico del organismo.
- Determinación de la evaporación máxima permitida (E_{req}) por las condiciones ambientales.
- Cálculo de la sudoración requerida (SW_{req}) y de la humedad requerida de la piel (w_{req}).

4.2.2.1 Determinación de las variables

- **Cálculo de la evaporación requerida (E_{req})**

La acumulación de calor en el cuerpo humano (S) se puede expresar como la suma algebraica de los siguientes términos:

$$S = M - W - K - C - R - C_{res} - E_{res} - E \quad (1)$$

Donde:

M es la producción de energía metabólica.

W es el trabajo exterior útil.

K es el calor intercambiado con el ambiente por conducción.

C es el calor intercambiado por convección.

R es el calor intercambiado por radiación.

C_{res} es el calor intercambiado por convección respiratoria.

E_{res} es el calor latente intercambiado a través de la respiración.

E es el calor intercambiado por la evaporación del sudor.

Todos los términos de la ecuación (1) están expresados como potencia por unidad de superficie corporal y las unidades que se emplean son normalmente W/m².

Puede despreciarse la pérdida de energía como consecuencia del trabajo útil desarrollado en la actividad laboral, pues el rendimiento real del organismo suele ser pequeño en casi todas las tareas. En la práctica, el término de conducción de calor (K) tampoco es tenido en cuenta. Debido a lo pequeñas que resultan las superficies de contacto frente a la superficie corporal, al aislamiento que suponen las prendas de vestir y a que, en general, cuando las superficies de contacto están a muy diferente temperatura de la piel, éstas suelen estar aisladas. Por otra parte, la transmisión de calor que se lleva a cabo por

conducción puede, en general, estar asumida cuantitativamente por los intercambios de calor por convección y radiación que habría si las superficies no estuvieran en contacto con la piel. Para mantener constante la temperatura del cuerpo, el término S debe ser nulo y entonces el término de evaporación del sudor se denomina evaporación requerida (E_{req}).

$$E_{req} = M - C - R - C_{res} - E_{res} \quad (2)$$

El término M debe hallarse con un método que ofrezca una cierta fiabilidad (ver NTP 323.1993). Los términos de convección C y radiación R se calculan mediante las siguientes expresiones:

$$C = hc Fcl (tsk - ta) \quad (3)$$

$$R = \sigma \epsilon sk Fcl Ar /ADU [(tsk + 273)^4 - (tr + 273)^4] \dots \quad (4)$$

Si hacemos en la ecuación:

$$hr = \sigma \epsilon sk Ar /ADU [(tsk + 273)^4 - (tr + 273)^4] / (tsk - tr) \quad (5)$$

Entonces:

$$R = hr Fcl (tsk - tr) \quad (6)$$

De esta forma se obtiene que:

$$E_{req} = M - \{hcFcl (tsk - ta)\} - \{hr Fcl (tsk - tr)\} - C_{res} - E_{res} \quad (7)$$

Donde los significados de los símbolos no definidos hasta ahora son los siguientes:

hc es el coeficiente de intercambio de calor por convección en w/m². Se expresa de la siguiente forma:

- Si la convección es natural: $hc = 2,38 (tsk - tr)^{0,25}$
- Si es forzada:

$$hc = 3,5 + 5,2 \text{ Var si Var es menor o igual que } 1 \text{ m/s.}$$

$$hc = 8,7 \text{ Var}^{0,6} \text{ si Var es mayor que } 1 \text{ m/s.}$$

Siendo Var la velocidad relativa del aire, cuya expresión es:

$$\text{Var} = Va + 0,0052 (M - 58)$$

Donde Va es la velocidad medida del aire en el lugar de trabajo.

Fcl es el factor adimensional de reducción, de los intercambios de calor sensible debidos al atuendo. Su valor se deduce de la ecuación:

$$F_{cl} = 1 / [1/ (1 + 1,97 I_{cl}) + (h_c + h_r)] I_{cl}'$$

donde I_{cl} es el aislamiento térmico intrínseco del atuendo. Para estimar el valor de I_{cl} , se usará la tabla siguiente:

Descripción de las prendas	Resistencia térmica I_{cl} (clo)
Ropa interior	
Calzoncillos	0.03
Calzoncillos largos	0.10
Camiseta de tirantes	0.04
Camiseta de manga corta	0.09
Camiseta de manga larga	0.12
Sujetadores y bragas	0.03
Camisas – Blusas	
Manga corta	0.15
Ligera, mangas cortas	0.20
Normal, mangas largas	0.25
Camisa de franela, mangas largas	0.30
Blusa ligera, mangas largas	0.15
Pantalones	
Corto	0.06
Ligero	0.20
Normal	0.25
Franela	0.28
Vestidos – Faldas	
Falda ligera (verano)	0.15
Falda gruesa (invierno)	0.25
Vestido ligero, mangas cortas	0.20
Vestido de invierno, mangas largas	0.40
Mono de trabajo	0.55

Tabla 8. Propiedades ópticas de las cubiertas solares

- t_{sk} es la temperatura cutánea media en grados centígrados (se toman 36° C).
- t_a es la temperatura del aire en grados centígrados.
- s es la constante de Stefan Boltzman ($5,67 \cdot 10^{-8} \text{ w/m}^2\text{K}^4$).
- ϵ_{sk} es la emisividad cutánea (0,97).
- A_r/ADU es la fracción de superficie cutánea participante en los intercambios de calor por radiación (0,67 para trabajo agachado; 0,70 para trabajo sentado y 0,77 para trabajo de pie).
- T_r es la temperatura radiante media en grados centígrados.
- h_r es el coeficiente de radiación en $\text{w/m}^2\text{K}$, cuya expresión es:

$$h_r = \sigma \epsilon_{sk} A_r / ADU [(t_{sk} + 273)^4 - (t_r + 273)^4] / (t_{sk} - t_r)$$
- C_{res} es el calor intercambiado por convección respiratoria, que, para una temperatura estimada del aire expirado de 35° C, vale:

- $C_{res} = 0,0014 M (35 - t_a)$
- E_{res} es el calor intercambiado por evaporación respiratoria que, para una temperatura estimada del aire expirado de $35^\circ C$, viene dado por:

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

- **Cálculo de la evaporación máxima permitida por el ambiente (E_{max})**

La pérdida evaporativa máxima es la que el individuo puede realizar bajo la hipótesis de la piel íntegramente mojada, donde se cumple:

$$E_{max} = (p_{sk,s} - p_a) / R_t \quad (8)$$

En la que:

- $p_{sk,s}$ es la presión de saturación del vapor de agua a la temperatura de la piel en Kilopascuales (a $35^\circ C$ es de 5,624 KPa).
- p_a es la presión parcial del vapor de agua a la temperatura ambiente en KPa.

Se calcula mediante la siguiente expresión:

$$p_a = [10(8,8446 - 2225/(t_h + 273)) - 0,5 (t_a - t_h)] / 7,57$$

donde t_h es la temperatura húmeda psicrométrica.

- R_t es la resistencia evaporativa total de la capa limitante de aire y atuendo de vestir. Su cálculo se basa en la expresión:

$$R_t = 1 / 16,7 hc F_{pcl}$$

Aquí, F_{pcl} es el factor adimensional de reducción de los intercambios de calor latente debidos al atuendo. Se calcula a través de la ecuación:

$$F_{pcl} = 1 / \{1 + 2,22 hc [I_{cl} - (1 - 1/(1 + 1,97 I_{cl}))]/(hc + h_r)\}$$

- **Cálculo de la humedad requerida de la piel (w_{req}) y de la sudoración requerida (SW_{req})**

La humedad de la piel (w) en una situación de trabajo determinada se define como un factor que multiplicado por la evaporación máxima da el valor de la evaporación real:

$$w E_{max} = E \quad (9)$$

La humedad requerida de la piel está entonces expresada como la razón entre la evaporación requerida y la evaporación máxima:

$$W_{req} = E_{req} / E \quad (10)$$

El cálculo de la sudoración se basa en la expresión:

$$SW = E / r \quad (11)$$

donde r es la eficacia evaporativa de la sudoración del individuo desnudo, coeficiente adimensional que es función de la humedad de la piel.

$$r = 1 - w_2 / 2 \quad (12)$$

De la ecuación $SW = E / r$ se deduce que:

$$SW_{req} = E_{req} / r_{req} \quad (13)$$

en la que r_{req} se obtiene de sustituir w por w_{req} en la ecuación (12). SW_{req} es la sudoración requerida expresada en w/m^2 , cuya equivalencia en agua perdida por sudoración es $SW_{req} (w/m^2) / 0,68 = SW_{req} (gr/m^2 h)$.

- Cálculo de la humedad de la piel

Siguiendo con el desarrollo del modelo de confort térmico, el valor de la humedad real en piel será necesario para determinar el valor de la evaporación real de sudor, y por tanto la tasa de sudoración.

Las pérdidas totales de calor por evaporación de agua en la superficie de la piel \dot{Q}_{evap} se deben a la contribución de la sudoración \dot{Q}_{evap}^{sud} , como mecanismo de control termoregulatorio, y a la contribución de la difusión de vapor de agua a través de la piel \dot{Q}_{evap}^{dif} , de forma que $\dot{Q}_{evap} = \dot{Q}_{evap}^{sud} + \dot{Q}_{evap}^{dif}$. Estas pérdidas totales dependen, entre otros factores, de la humedad de la piel w y de la diferencia entre la presión de vapor de agua en la piel $p_{v,piel}$ y en el ambiente $p_{v,a}$, y se calcula como:

$$\dot{Q}_{evap} = A_D \cdot \frac{w}{r_{dif}^{vest} + \frac{1}{f_{vest} \cdot h_m}} \cdot (p_{sat}(T_{piel}) - \phi \cdot p_{sat}(T_a))$$

En la Ecuación **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** la presión de vapor de agua en la superficie de la piel $p_{v,piel}$ se calcula como la presión de saturación a la temperatura de la piel $p_{v,piel} = p_{sat}(T_{piel})$, y $p_{v,a} = \phi \cdot p_{sat}(T_a)$. Por su parte, la humedad de la piel w puede ser determinada a partir de la relación entre las pérdidas de calor latente

debidas a la sudoración termoregulatoria \dot{Q}_{evap}^{sud} y las máximas pérdidas posibles por evaporación $\dot{Q}_{evap,max}$:

$$w = 0.06 + 0.94 \cdot \frac{\dot{Q}_{evap}^{sud}}{\dot{Q}_{evap,max}}$$

donde $\dot{Q}_{evap,max}$ representan las máximas pérdidas posibles de calor latente por evaporación en las mismas condiciones ambientales y de vestimenta, y con una piel completamente mojada, y se calcula mediante la Ecuación **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** con $w = 1$. Este $\dot{Q}_{evap,max}$ representa, por tanto, un límite teórico superior para \dot{Q}_{evap} . El mecanismo termorregulatorio \dot{Q}_{evap}^{sud} puede ser obtenido en función de las desviaciones de las temperaturas del interior del cuerpo y de la piel con respecto de sus valores normales:

$$\dot{Q}_{evap}^{sud} = c_{sw} \cdot (T_b - T_{b,set}) \cdot e^{-\frac{T_{piel}-34}{10.7}}$$

donde $c_{sw} = 170 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ y:

$$T_b = (1 - \alpha_{piel}) \cdot T_c + \alpha_{piel} \cdot T_{piel}$$

$$T_{b,set} = (1 - \alpha_{piel}) \cdot 37 + \alpha_{piel} \cdot 34$$

En las Ecuaciones **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** y **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** α_{piel} representa la fracción de la masa total del cuerpo asociada a la zona de la piel (desde el punto vista térmico), y se calcula como:

$$\alpha_{piel} = 0.0418 + \frac{0.745}{\dot{V}_{bl} - 0.585}$$

Los gradientes de temperatura de la Ecuación **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** son establecidos a cero en el caso de que sean negativos, y además \dot{Q}_{evap}^{sud} es limitado en el modelo a $670 \text{ W}/\text{m}^2$.

En la Ecuación **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** h_m es el coeficiente de transferencia de masa, y puede ser calculado a partir del número de Lewis Le y del coeficiente de película convectivo h_{cv} :

$$h_m = \frac{h_{cv}}{Le}$$

donde un valor típico de Le es 16.5 K/kPa (ASHRAE).

Por otra parte, en la Ecuación **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** r_{dif}^{vest} es la resistencia a la difusión de vapor de agua a través de la vestimenta, y puede calcularse como:

$$r_{dif}^{vest} = \frac{r_{cd}^{vest}}{Le \cdot i_{vest}}$$

donde i_{vest} es el rendimiento de la barrera a la difusión de vapor de agua de la vestimenta y, aunque puede ser obtenido experimentalmente (Nishi, González, & Gagge, 1975) (Umbach, 1980) (Holmér, I., 1984) (McCullough, An insulation data base for military clothing, 1986), la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** proporcionada por ASHRAE, contiene datos que pueden ser usados para la mayoría de casos prácticos. En caso de que la vestimenta real no se encuentre, un valor de 0.34 puede ser usado.

Clothing Insulation Values for Typical Ensembles*

Clothing Description	Garments Included[†]	I_{cl}, (clo)
Trousers	1) Trousers, short-sleeve shirt	0.57
	2) Trousers, long-sleeve shirt	0.61
	3) #2 plus suit jacket	0.96
	4) #2 plus suit jacket, vest, T-shirt	1.14
	5) #2 plus long-sleeve sweater, T-shirt	1.01
	6) #5 plus suit jacket, long underwear bottoms	1.30
Skirts/Dresses	7) Knee-length skirt, short-sleeve shirt (sandals)	0.54
	8) Knee-length skirt, long-sleeve shirt, full slip	0.67
	9) Knee-length skirt, long-sleeve shirt, half slip, long-sleeve sweater	1.10
	10) Knee-length skirt, long-sleeve shirt, half slip, suit jacket	1.04
	11) Ankle-length skirt, long-sleeve shirt, suit jacket	1.10
Shorts	12) Walking shorts, short-sleeve shirt	0.36
Overalls/Coveralls	13) Long-sleeve coveralls, T-shirt	0.72
	14) Overalls, long-sleeve shirt, T-shirt	0.89
	15) Insulated coveralls, long-sleeve thermal underwear tops and bottoms	1.37
Athletic	16) Sweat pants, long-sleeve sweatshirt	0.74
Sleepwear	17) Long-sleeve pajama tops, long pajama trousers, short 3/4 length robe (slippers, no socks)	0.96

Tabla 9. Valores del índice icl para distintos tipos de vestimenta

5. Análisis del confort: casos de estudio

La instalación de las estrategias de aumento de confort térmico en este espacio exterior, explicadas en los puntos anteriores están concebidas para permitir al ocupante un mayor tiempo de permanencia en condiciones de confort térmico. En este punto se analizará una serie de combinaciones de estas estrategias, basándonos en los valores de la Temperatura Radiante y la Tasa de sudoración (en gr/h). Los casos son los que se explican a continuación:

- **Caso de referencia:** o caso base, será el caso en el que el espacio no presenta ninguna modificación, sólo están presentes los obstáculos – edificios y vegetación.
- **Caso 1:** al caso de referencia se le añade un elemento de sombra, y se analizan los efectos que tiene sobre el nivel de confort. Se trata de una cobertura opaca, con baja transmisividad, pero alta capacidad de reflexión.
- **Caso 2:** al caso de referencia se le añade un elemento de sombra, y se analizan los efectos que tiene sobre el nivel de confort. Se trata de una cubierta vegetal, de transmisividad típicamente 0.15. Dadas las propiedades reflectantes de las hojas, este tipo de cubierta suele tener un valor elevado para la reflectividad.
- **Caso 3:** al caso de referencia se le añade un elemento de sombra, y se analizan los efectos que tiene sobre el nivel de confort. Esta cobertura se caracteriza por tener similares absorptividad y reflectividad que la anterior.
- **Caso 4:** tras saber el elemento de sombra que afecta más favorablemente a las condiciones de confort, se analizarán estas condiciones aplicando la estrategia de confinamiento 1
- **Caso 5:** tras saber el elemento de sombra que afecta más favorablemente a las condiciones de confort, se analizarán estas condiciones aplicando la estrategia de confinamiento 2.
- **Caso 6:** tras saber el elemento de sombra que afecta más favorablemente a las condiciones de confort, se analizarán estas condiciones aplicando la estrategia de confinamiento 3.
- **Caso 7:** Se analizará el efecto de la estrategia 1 de enfriamiento evaporativo combinado con el elemento de sombra más efectivo.
- **Caso 8:** Se analizará el efecto de la estrategia 2 de enfriamiento evaporativo combinado con el elemento de sombra más efectivo
- **Caso 9:** Se analizará el efecto que tiene sobre el confort a combinación del elemento de sombra, el confinamiento del espacio más efectivo desde el punto de vista del confort, y la estrategia de enfriamiento evaporativo 2.

- **Caso 10:** Se analizará el efecto que tiene sobre el confort a combinación del elemento de sombra, el confinamiento del espacio más efectivo desde el punto de vista del confort, y la estrategia de enfriamiento evaporativo 2.

Casos	Coberturas					Confinamiento				Enfriamiento evaporativo		
	Ref	Cob 1	Cob 2	Cob 3	Cob 4	Ref	Conf 1	Conf 2	Conf 3	Ref	Enf 1	Enf 2
Ref	x					x				x		
Caso 1		x				x				x		
Caso 2			x			x				x		
Caso 3				x		x				x		
Caso 4				x			x			x		
Caso 5				x				x		x		
Caso 6				x					x	x		
Caso 7				x		x					x	
Caso 8				x		x						x
Caso 9				x					x		x	
Caso 10				x					x			x

Tabla 10. Casos propuestos: combinación de mejoras del confort térmico

5.0 Hipótesis de trabajo

Para llevar a cabo el análisis de los datos extraídos de las correspondientes simulaciones, se han realizado las siguientes hipótesis, algunas de las cuales ya nombradas en esta memoria:

1. La temperatura del aire y la humedad relativa son invariables en cada receptor, es decir, para cada volumen de estudio en los que se ha dividido el patio, estos valores serán los mismos para un día y una hora dados.
2. Tras colocar el elemento de sombra (cubierta), se considerará que la temperatura del aire por debajo de él permanece constante respecto al caso sin elemento de sombra.
3. Se considerará que, de cara al estudio de los factores de forma del sujeto con los elementos constructivos circundantes, el sujeto se encuentra mirando en dirección sur.
4. La inyección de agua en los casos de estudio en los que se emplea el enfriamiento evaporativo, el agua entra en contacto con el aire a una temperatura por debajo de la temperatura seca, y por encima de su temperatura húmeda, por lo que el aire se enfriará y se humidificará ganando entalpía. Corresponde al caso b de esta gráfica.

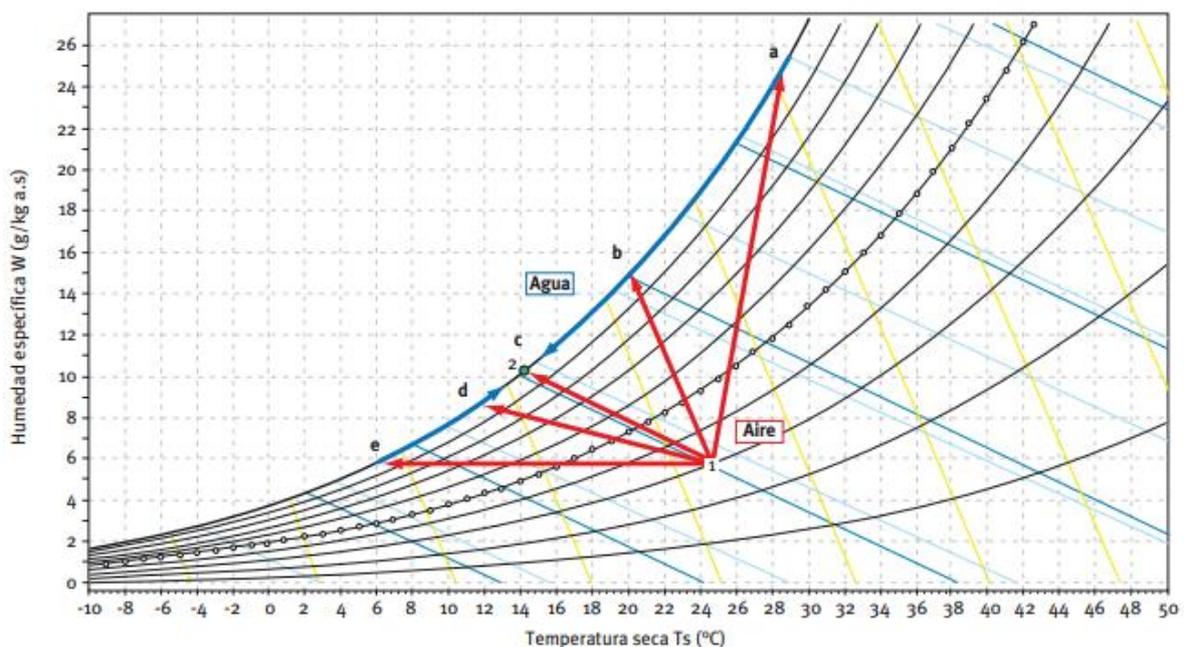


Imagen 30. Representación enfriamiento evaporativo en diagrama psicrométrico

5. Para el estudio de los fenómenos de transferencia de calor y sudoración, siguiendo el modelo de dos nodos, se ha considerado a una persona estándar de 1.40 m de

altura y un peso medio de 45 kilogramos, dado que los usuarios del espacio en cuestión serán niños comprendidos entre los 7 y 12 años.

6. Los días de referencia tomado para las simulaciones, como se explicó anteriormente, serán los días 15 de los meses de junio, julio, agosto y septiembre. Para que los efectos de las estrategias de mitigación se reflejen en los resultados siguientes, se ha decidido tomar como mes de referencia Julio, ya que en junio los valores de la tasa de sudoración a menudo son nulos debido a unas temperaturas cálidas, aunque no extremas.

5.1 Caso de referencia

En este caso se mostrarán las condiciones de confort que existen actualmente en el patio, en ausencia de cualquier elemento para mitigar las altas temperaturas. Ante valores tan altos de radiación solar directa y difusa en horas centrales del día, se tiene una temperatura radiante media de **33.7, 42.1, 46.7, y 42.3 °C** para las horas centrales del día en los meses de junio, julio, agosto y septiembre respectivamente.

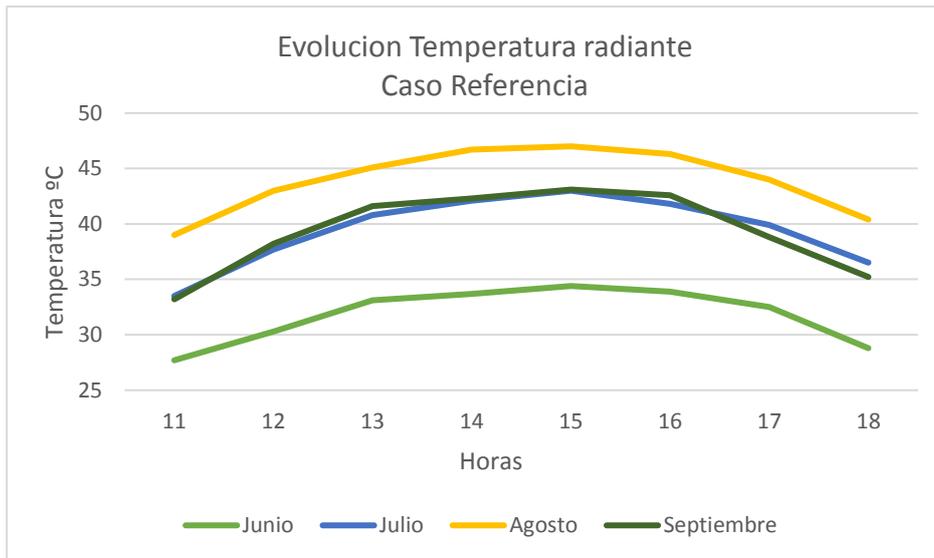


Imagen 31. Evolución temperaturas radiantes en el patio en ausencia de medidas de mejora

Atendiendo al mes de julio, se tiene que la temperatura radiante media es superior a la temperatura de aire seco a lo largo de todo el periodo de simulación, alcanzándose temperaturas radiantes de hasta 43 ° centígrados.

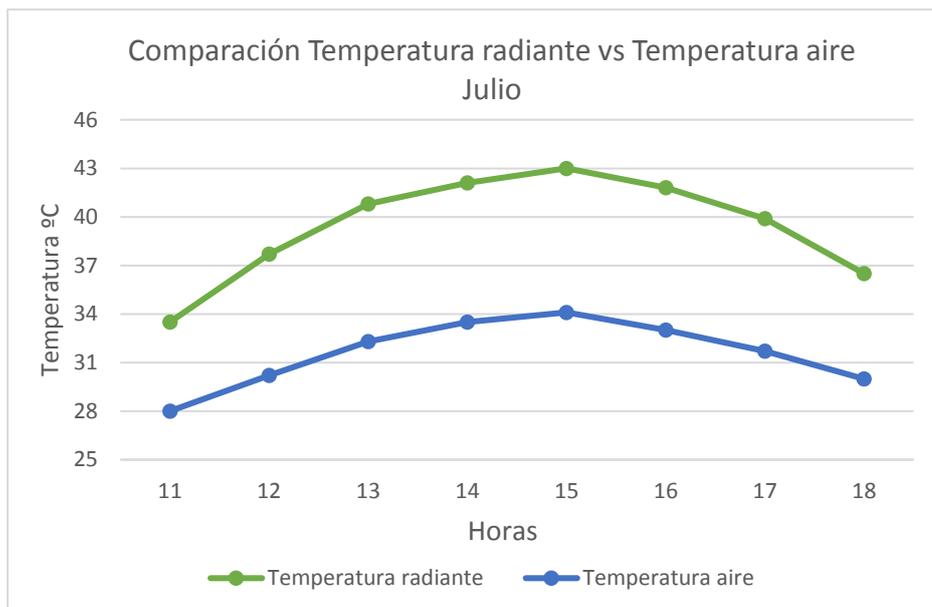


Imagen 32. Comparación temperatura radiante y temperatura del aire en el patio mes de julio

Si se representan las Temperaturas radiantes obtenidas sobre el espacio de interés, para un día 15 de julio a las 12:00 horas, se tiene la distribución de temperaturas que muestra la gráfica anexa. Esta distribución se justifica por la presencia de edificios en la zona sur y oeste del patio, así como un mayor valor del *Sky View Factor* en las zonas más calurosas. El resultado de las distintas contribuciones hace que se tengan temperaturas de hasta **43.5 °C** en algunos puntos del patio.

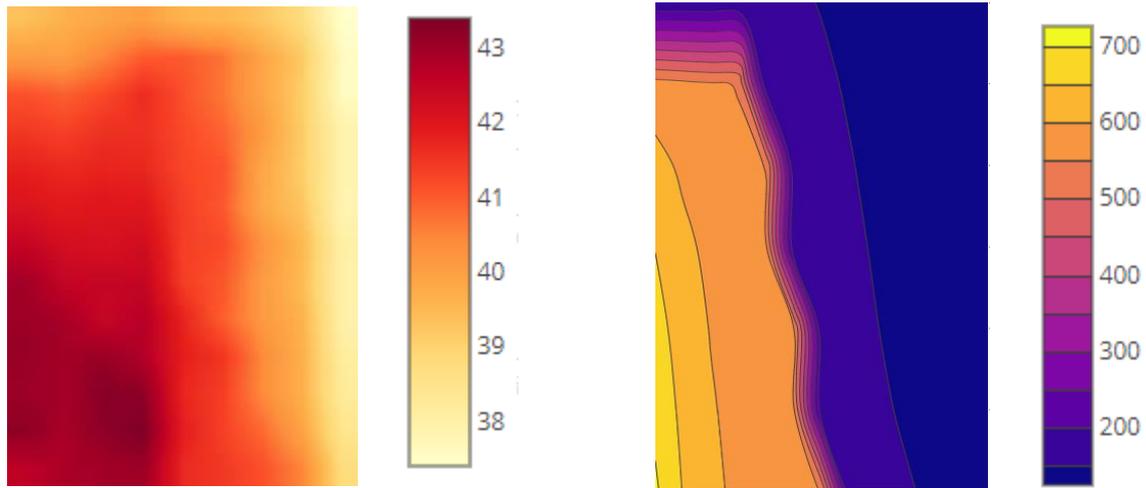


Imagen 32. Distribución de temperaturas radiantes en el patio en °C (izq.) y tasa de sudoración (dch) en gr/h. en caso de referencia.

Junto a esta gráfica se encuentra la distribución de la Tasa de sudoración, la cual oscila entre los **110 y 706 gr/h**, valores claramente fuera de confort para cualquier tiempo de permanencia.

5.2 Caso 1

En este caso se analizarán las condiciones de confort tras la instalación de la **cubierta 1**, para el mismo día que el caso de referencia, con mismas temperaturas de aire, velocidad del aire y humedad relativa que el caso anterior. Con un coeficiente de transmisividad de 0.3, la cubierta 1 corresponde a una cobertura opaca, con baja transmisividad, pero alta capacidad de reflexión. Para las 12:00 horas de un 15 de julio, se observa cómo la distribución de temperaturas ha bajado hasta 9,5 ° C en algunos puntos del espacio, debido en su mayor parte a la mitigación de la radiación incidente.

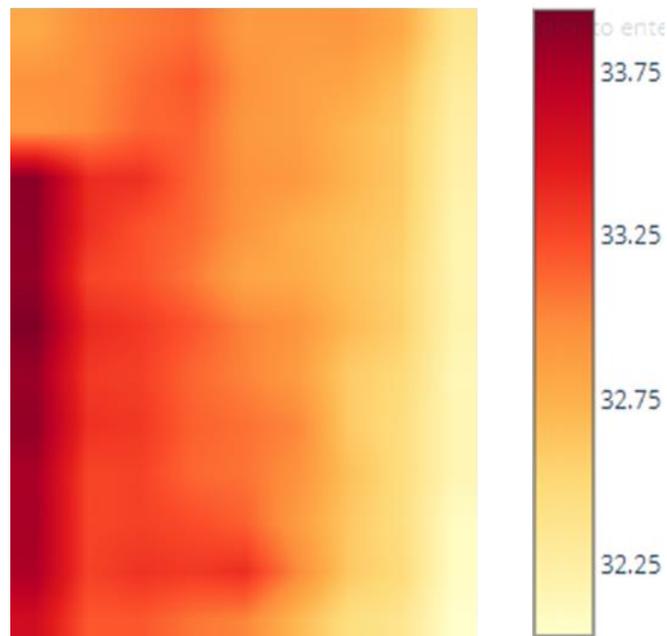


Imagen 33. Distribución de temperaturas radiantes en el patio en °C en caso 1

5.3 Caso 2

El caso dos corresponde con la situación en la que se instala la **cubierta 2**, para el mismo día que el caso de referencia, con mismas temperaturas de aire, velocidad del aire y humedad relativa. Se trata de una cubierta vegetal, de transmisividad típicamente 0.15 y altos valores de la reflectividad. En comparación con la cubierta anterior, la cubierta dos dejará pasar menos radiación incidente, efecto que se manifestará en los valores que tomarán las variables de confort. Para las 12:00 horas de un 15 de julio, se observa cómo la distribución de temperaturas **ha bajado de media 1,6 °C**, debido en su mayor parte a la mitigación de la radiación incidente.

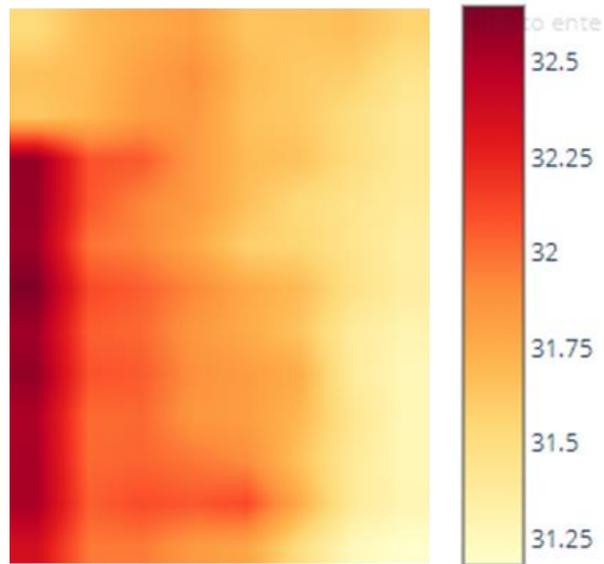


Imagen 34. Distribución de temperaturas radiantes en el patio en °C en caso 2

5.4 Caso 3

Este caso corresponde al patio con la **cubierta 3**, para el mismo día que el caso de referencia, con mismas temperaturas de aire, velocidad del aire y humedad relativa. Dado que la cobertura número 3 es la cobertura escogida con un menor valor de la transmisividad, los resultados reflejan una mejora apreciable en la temperatura radiante media en el espacio.

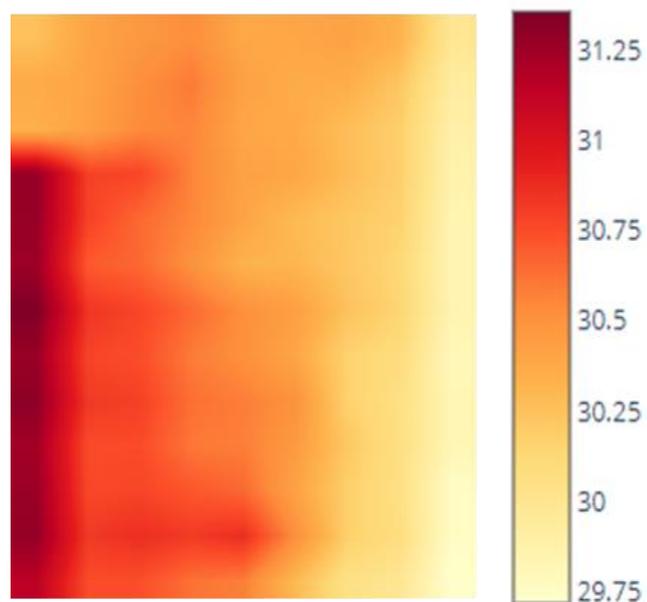


Imagen 35. Distribución de temperaturas radiantes en el patio en °C en caso 3.

Esta cobertura se caracteriza por tener similares absorptividad y reflectividad que la anterior, aunque una transmisividad más baja, de valor 0.1.

En comparación con la cubierta anterior, un valor menor de la transmisividad frena la radiación a través del elemento de sombra, provocando que la cubierta alcance temperaturas menores y por tanto el sujeto reciba menos temperatura radiante por parte del elemento de sombra. Para las 12:00 horas de un 15 de julio, se observa cómo la distribución de temperaturas **ha bajado de media 1,26 ° C** debido en su mayor parte a la mitigación de la radiación incidente.

El gráfico que aparece a continuación reúne los valores de temperatura radiante media para las 12:00 para los tres casos que se han analizado hasta ahora. Se han obtenido promedios de temperaturas medias radiantes de **32.95 ° C, 31.6 ° C y 30.45 ° C** para las coberturas uno, dos y tres respectivamente en el día de simulación.

Se observa que la instalación de la cobertura número tres ofrece una mejora de hasta **13,7 ° C** en comparación con el estado original del patio en el que no existen medidas de mejora del confort.

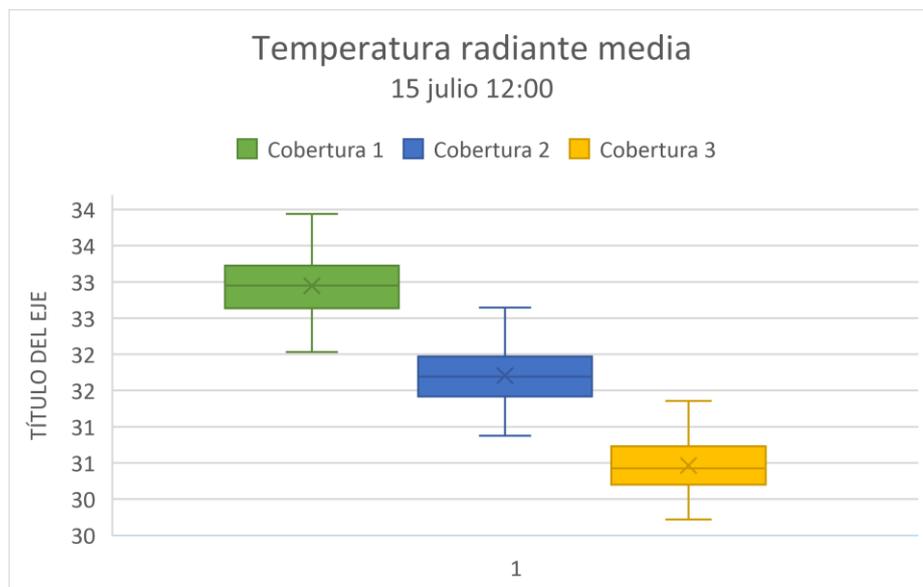


Imagen 36. Comparativa de temperaturas radiantes para las distintas coberturas solares.

La reducción significativa de la temperatura de la cobertura se manifiesta en los valores de sudoración que experimenta el sujeto en distintos puntos del patio. En la imagen que aparece a continuación se ha representado el valor de la tasa de sudoración en gramos por hora -

para el mismo día de simulación – cuando se modifica el espacio de interés con la instalación de la cubierta uno, dos y tres, leyendo de izquierda a derecha la imagen.

Se puede apreciar cómo en el patio con la cubierta uno se tienen tasas de sudoración en el rango de **80-110 gr/h**, admisibles para estancias muy cortas del sujeto en el espacio. Tras la instalación de la cubierta dos, se tiene una caída de 18.5 gr/h en la totalidad del espacio, bajando la tasa de sudoración a niveles que se mueven en el rango de **95-50 gr/h**, aún bastantes altos para estancias largas, propia del uso que se le da a este espacio.

La instalación del elemento de sombra número tres, evidencia que ante menores transmisividades del material de la cubierta, menor será la temperatura radiante que vea el sujeto, y menor la tasa de sudoración. Se obtienen tasas de sudoración de van desde **75 gr/h a 30 gr/h**.

Aunque hayan mejorado las condiciones de ocupación del espacio, siguen siendo valores altos para las dos variables de confort que se han obtenido.

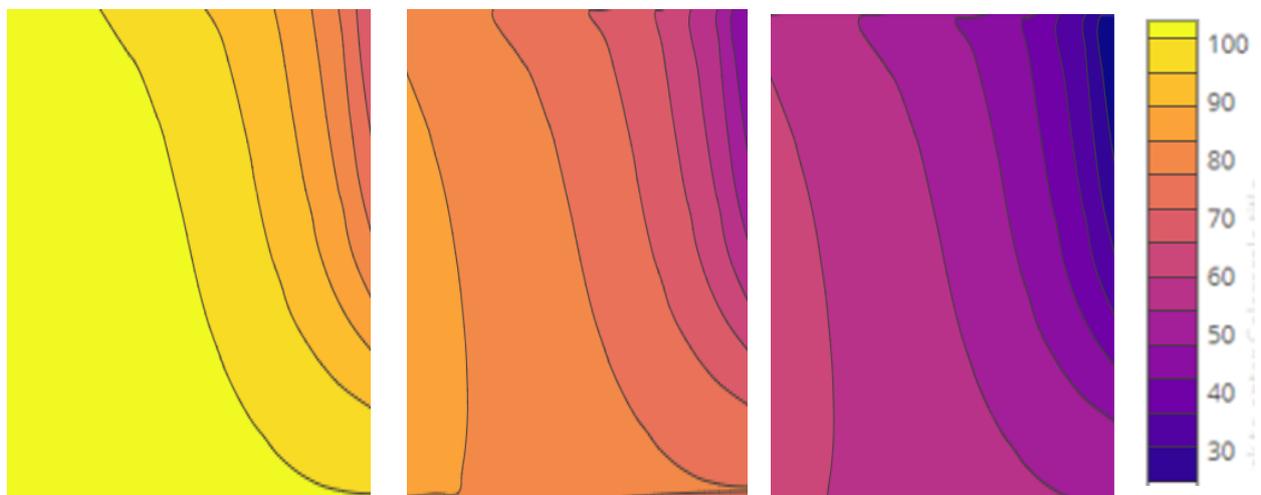


Imagen 37. Comparativa de tasas de sudoración para las distintas coberturas solares

5.5 Casos 4, 5 y 6

Estos casos representan al espacio de trabajo provisto con la cobertura número 3, por ser la más conveniente, y las estrategias de confinamiento explicadas en el punto 4.2 de esta memoria, siendo los casos 4, 5 y 6 respectivamente.

En el análisis de la temperatura radiante media, se tienen promedios de 30.463, 30.49 y 30.47 ° C para las estrategias uno, dos y tres respectivamente, por lo que la estrategia de confinamiento óptima atendiendo a este criterio será la número 3. En comparación con el caso en el que no hay confinamiento, la temperatura radiante permanece casi inalterable, por lo que es de cuestionar el uso de esta medida de mitigación de las altas temperaturas en cuanto a temperatura radiante se refiere.

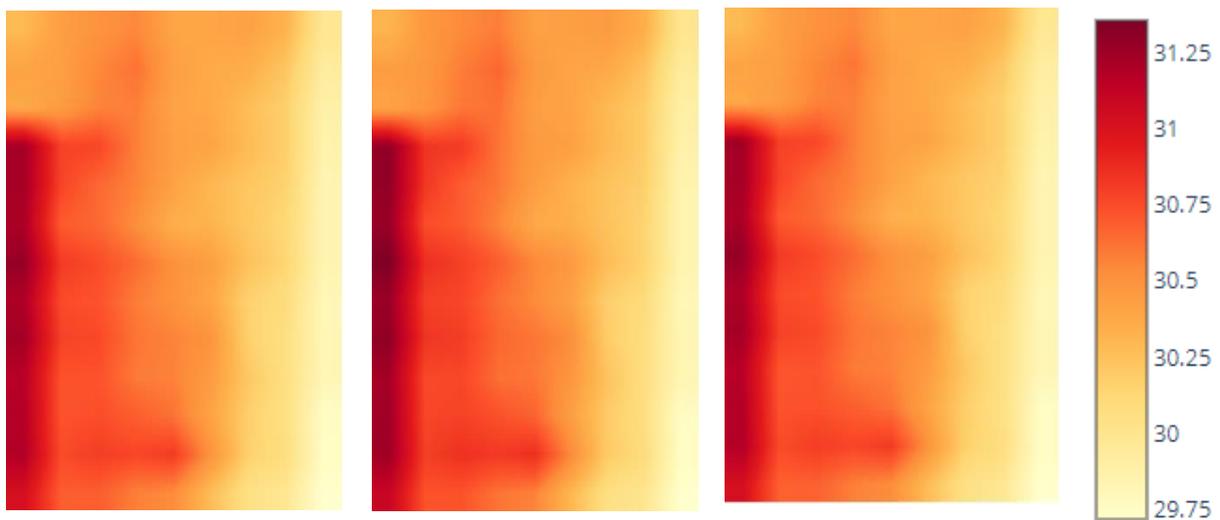


Imagen 38. Comparativa de temperaturas radiantes para las distintas medidas de confinamiento

En cuanto a la tasa de sudoración, la influencia de las distintas estrategias de confinamiento es más evidente, pues existen velocidad y distribución distinta en el campo de viento, y esto afecta de manera más directa al coeficiente de película convectivo, y por tanto a la evacuación del calor por sudoración. La comparativa de los casos se refleja en la imagen que aparece a continuación.

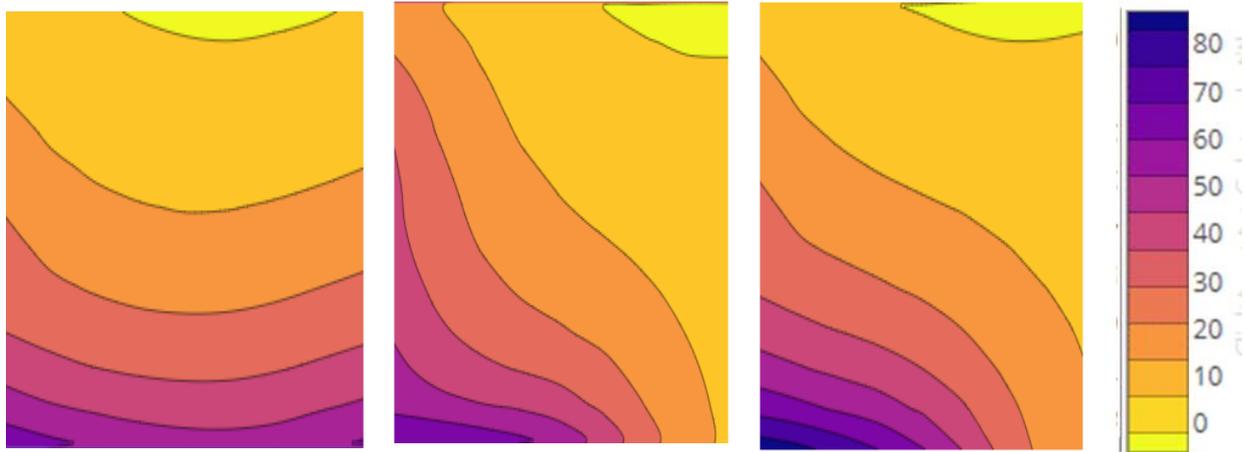


Imagen 39. Comparativa de tasas de sudoración para las distintas medidas de confinamiento en gr/h

En el modelo de cálculo para estos casos en los que se comparan las distintas estrategias de confinamiento, se ha decidido emplear un coeficiente de película convectivo que dependa de la velocidad del aire (para velocidades mayores a 1 m/s), para que la influencia sobre la tasa de sudoración sea más evidente. La simulación con coeficientes de película constantes no reflejaba resultados que dieran preferencia a una medida de confinamiento sobre otra.

Si se analizan los valores de la tasa de sudoración, para un 15 de julio a las 12:00 horas, se obtienen valores medios de 25,25 gr/h, 31,4 gr/h y 23,9 gr/h para las estrategias de confinamiento uno, dos y tres respectivamente, estando el patio equipado previamente con la cobertura número tres. Atendiendo a ambos criterios, la estrategia de confinamiento más adecuada será la última que se ha propuesto, ya que existe una pequeña mejoría en la tasa de sudoración, y la temperatura media radiante es la mejor de los tres casos.

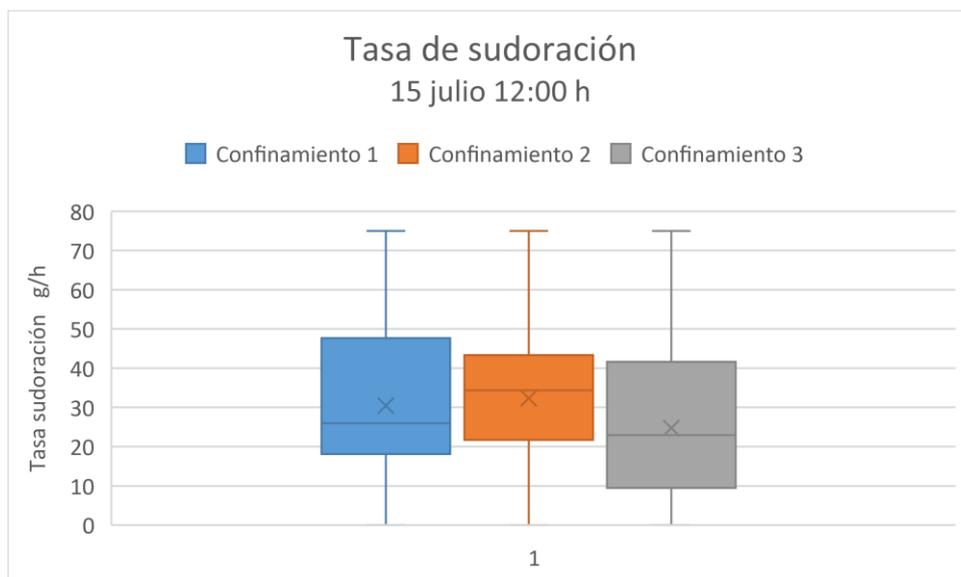


Imagen 40. Comparativa de tasas de sudoración acumuladas para distintas medidas de confinamiento

5.6 Caso 7

Este caso corresponde al espacio de interés provisto de la cobertura solar 3 y el sistema de enfriamiento evaporativo tipo uno, explicado en el 4.3 de esta memoria. Para unas condiciones de 30,2 °C de temperatura del aire, la mejora respecto a la temperatura seca empleando el enfriamiento evaporativo tipo 1, se manifiesta en una bajada de hasta tres grados en algunos puntos del espacio en estudio tal y como muestra la siguiente distribución de temperaturas. La temperatura media del aire pasa a ser de media 28,62 °C.

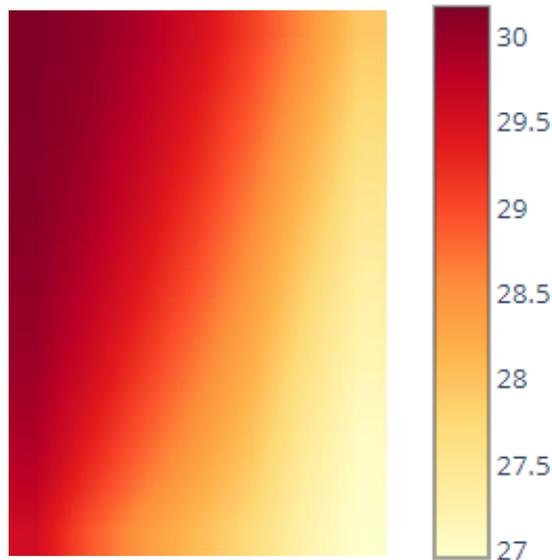


Imagen 41. Modificación de la temperatura del aire en ° C con método de enfriamiento evaporativo tipo 1.

En cuanto a la modificación de los parámetros de confort, se tiene que la temperatura radiante, en comparación el caso anterior, ha disminuido hasta dos grados en las zonas con más altas temperaturas, y hasta 12 °C en las zonas con menor temperatura inicialmente.

Esto se debe principalmente a la bajada de temperatura del aire seco. Sin embargo, las zonas más alejadas del vaporizador de agua mantienen unas temperaturas radiantes medias similares con respecto al caso anterior en el que no existe esta medida.

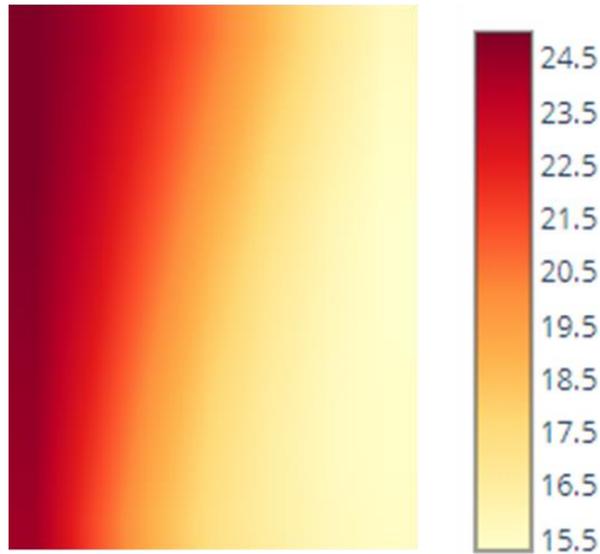


Imagen 42. Distribución de temperaturas radiantes en °C en el patio para caso 7

El efecto sobre la sudoración de esta medida de aumento del confort es muy significativo respecto a los casos anteriores. Puede apreciarse claramente, cómo la tasa de sudoración se hace prácticamente nula en aquella zona del espacio en la que la temperatura radiante ha bajado drásticamente, y, por el contrario, mantiene valores altos - que oscilan entre los [50 y 70 gr/h](#) - en las zonas en la que la temperatura radiante no ha variado respecto al caso anterior.

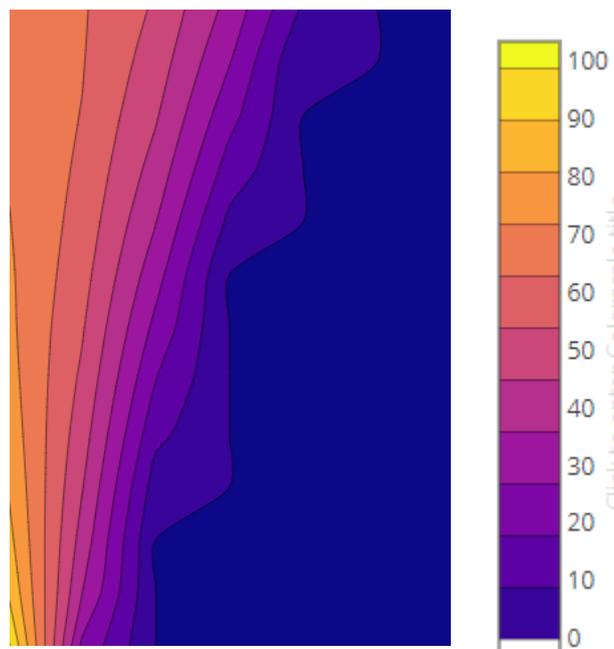


Imagen 43. Distribución de tasa de sudoración en gr/h en el patio para caso 7

5.7 Caso 8

Este caso corresponde al patio provisto de la cobertura solar 3 y el sistema de enfriamiento evaporativo tipo dos, explicado en el punto 4.3. De la misma manera que con el otro sistema de enfriamiento, la temperatura seca del aire se ve modificada respecto a la situación inicial (temperatura uniforme en el espacio de 30,2 °C).

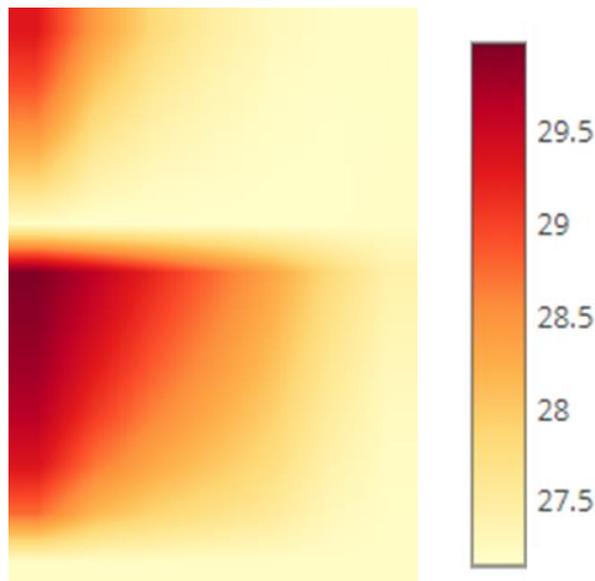


Imagen 44. Modificación de la temperatura del aire en °C con método de enfriamiento evaporativo tipo 1.

El análisis de la temperatura radiante media concluye que este método, en ausencia de confinamiento, es más eficaz que el sistema de enfriamiento anterior, pues la mayoría del espacio de estudio se encuentra en temperaturas por debajo de los 18 ° C. aunque en la zona de mayor temperatura apenas se aprecia el efecto respecto al caso anterior.

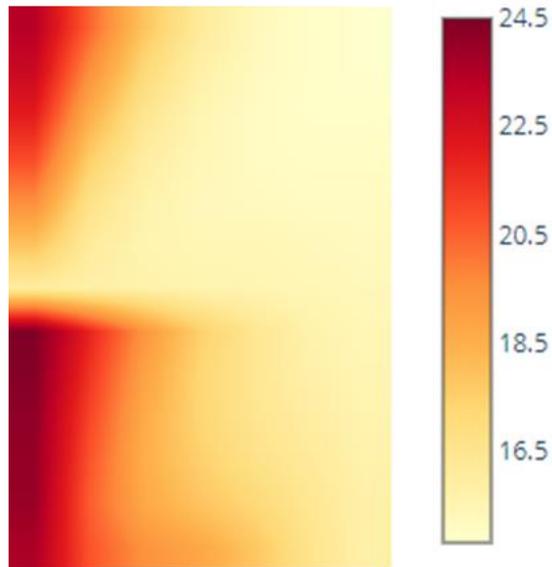


Imagen 45. Distribución de la temperatura radiante media en ° C para caso 8

La gráfica siguiente representa la media de las temperaturas radiantes diarias para los casos 7 (enfriamiento tipo 1 sin confinamiento) y casos 8 (enfriamiento tipo 2 sin confinamiento), siendo estas últimas inferiores, hasta 1,5 °C de media.

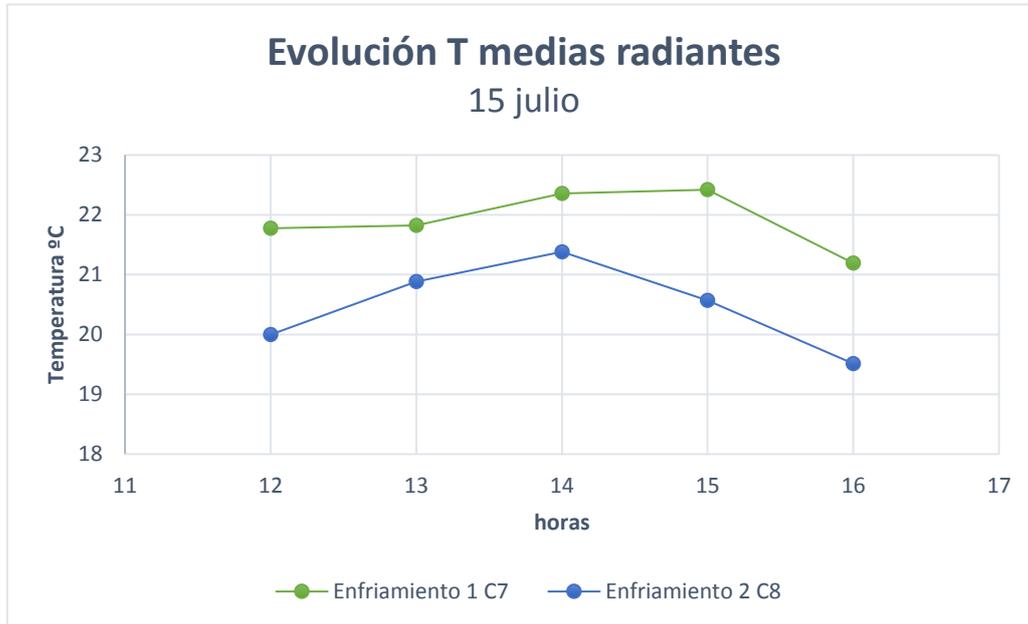


Imagen 46. Comparativa evolución de temperaturas radiantes para caso 7 y caso 8

La presencia de una hilera adicional de vaporizadores tiene un efecto positivo sobre la sudoración de los ocupantes. Aunque con el método de enfriamiento tipo uno se ha conseguido una tasa de sudoración nula en casi la mitad del espacio a ocupar, este nuevo sistema mejora la tasa de sudoración como se puede observar a continuación:

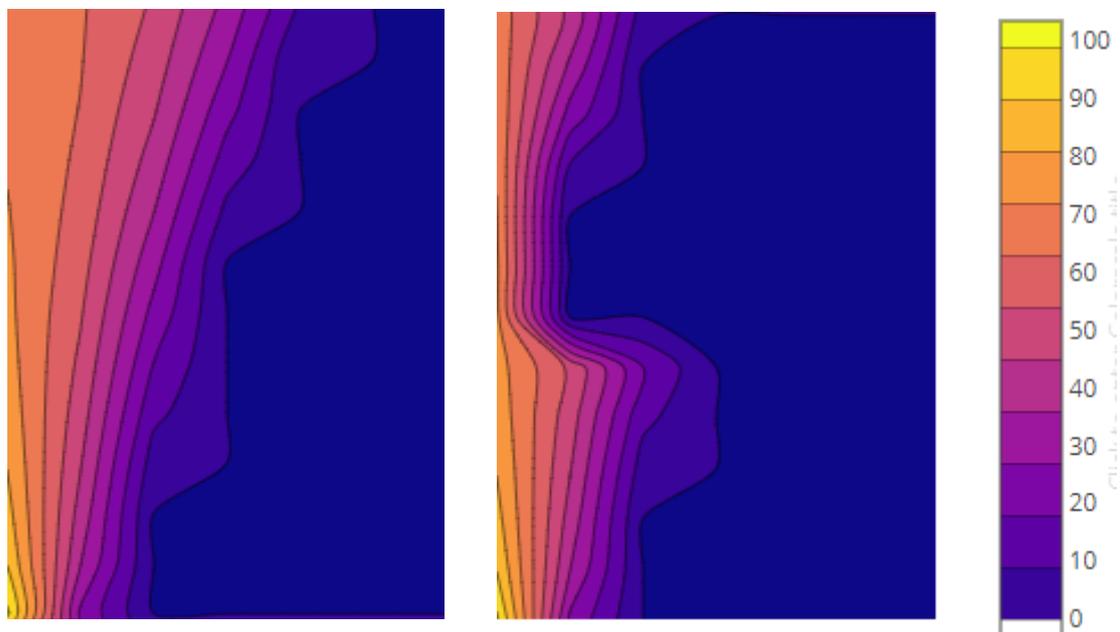


Imagen 47. Comparativa de distribución de tasa de sudoración en gr/h en el patio para caso 7 y 8

5.8 Caso 9

Este caso corresponde al patio provisto de la cobertura solar 3, la estrategia de confinamiento 3 detallada en el punto 4.1.3 de esta memoria y el sistema de enfriamiento evaporativo tipo uno. Para unas condiciones de 30,2 grados de temperatura del aire a las 12:00 horas, la temperatura seca del aire se ve modificada como muestra la siguiente imagen. Respecto al caso 8, en el que no se emplea confinamiento, la temperatura del aire tiene la misma distribución de valores, siendo de media 0.73°C más alta, justificados por la presencia de la hilera de vaporizadores en la zona sur del patio.

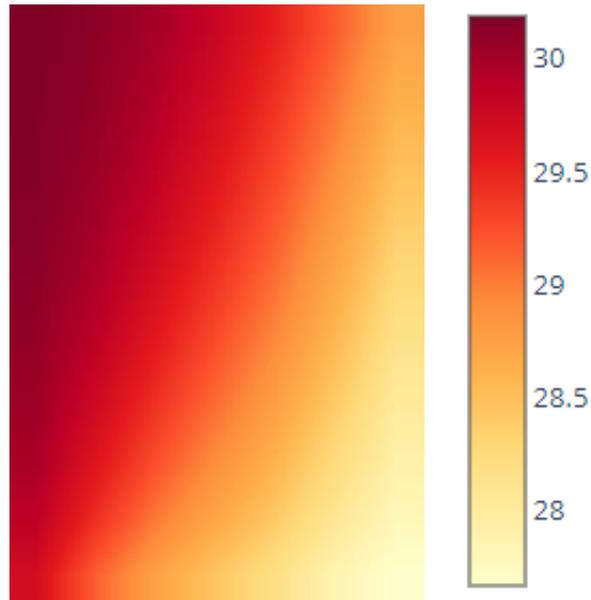


Imagen 48. Modificación de temperatura del aire en ° C para caso 9

En lo que respecta a la modificación de las temperaturas radiantes en el patio, se observa con dificultad en la comparativa de imágenes cómo ha afectado la medida de confinamiento al espacio: la temperatura radiante media en el caso con confinamiento es ligeramente mayor debido a la distribución del capo de viento. De nuevo, como ha ocurrido con los casos 8 y 10, esta diferencia es mínima y sólo remarcable durante una o dos horas durante el tiempo de ocupación.

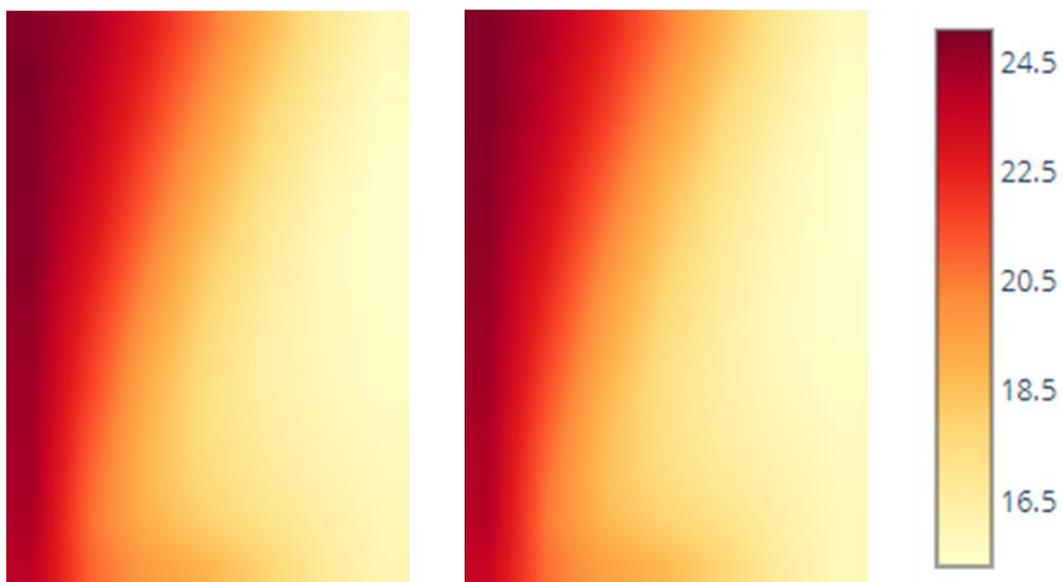


Imagen 49. Comparativa de temperaturas radiantes en °C para casos 9 (izq.) y 7(dch.)

El efecto sobre la sudoración de la presencia de confinamiento en el patio se aprecia sutilmente, en particular en la zona oeste del mismo. La tasa de sudoración se sigue manteniendo nula en la mitad de la superficie del patio, y disminuye de media **17,6 gr/h** en la zona oeste del espacio.

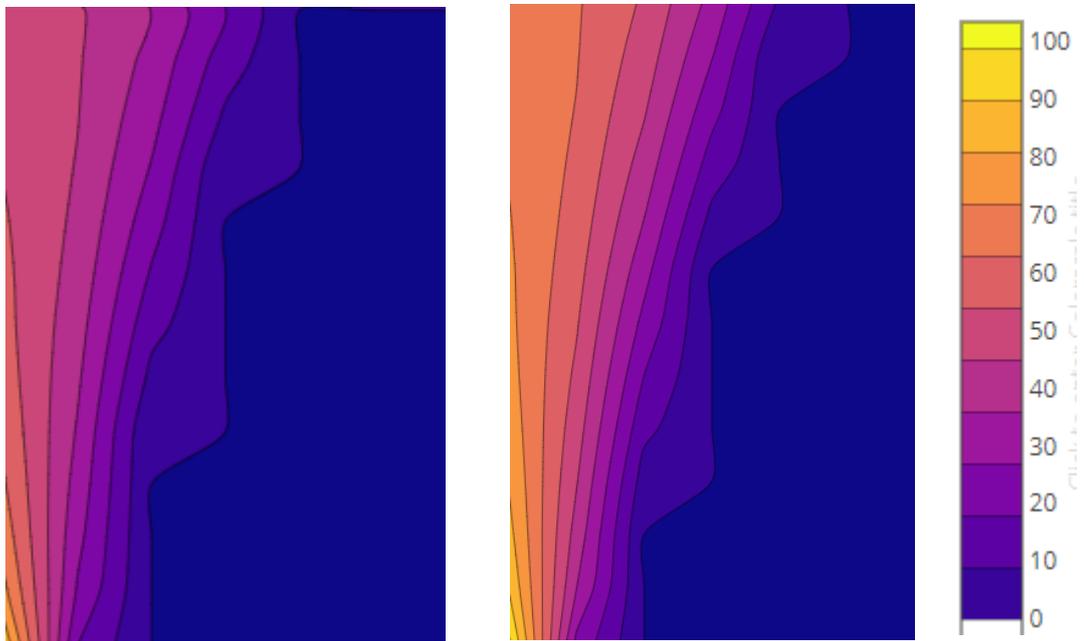


Imagen 50. Comparativa de distribución de tasa de sudoración en gr/h en el patio para caso 7 y 9

Si comparamos la aportación de agua que requiere esta estrategia de enfriamiento cuando el patio tiene elementos de confinamiento, correspondiente al caso 7, y cuando no está provisto de estrategia de confinamiento, obtenemos esta gráfica, en la que se observa que el caudal de agua se dispara para conseguir una reducción media de **17,6 gr/h** en la tasa de sudoración, con lo que se confirma que no estaría justificado el uso de confinamiento en este estudio, porque no supone un aumento drástico del tiempo de permanencia.

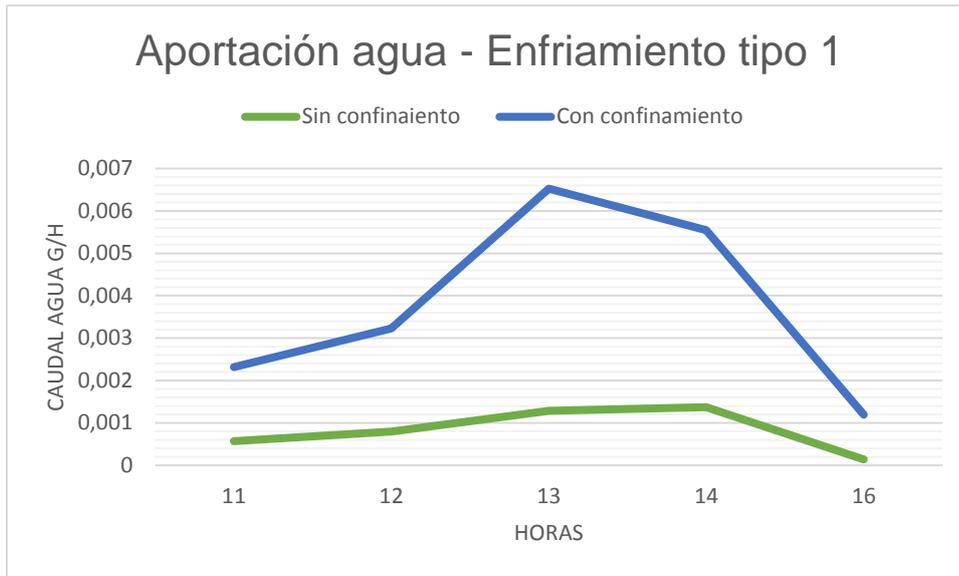


Imagen 51. Comparativa de aportación de caudal de agua para enfriamiento tipo 1 casos 7 y 9 en g/h

5.9 Caso 10

Este caso corresponde al espacio de interés provisto de la cobertura solar 3, la estrategia de confinamiento escogida en el punto 5.4 y el sistema de enfriamiento evaporativo tipo dos. Para unas condiciones de 30,2 °C de temperatura del aire, la mejora respecto a la temperatura seca se refleja en la imagen adjunta, suponiendo una bajada de hasta tres grados en algunos puntos del espacio en estudio tal y como muestra la distribución de temperaturas.

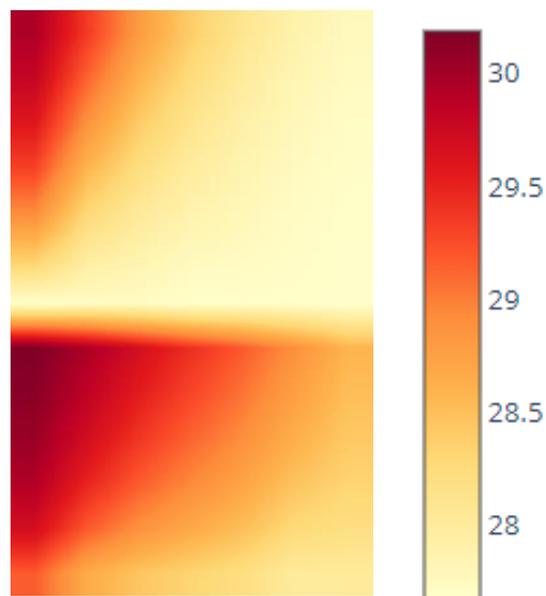


Imagen 52. Modificación de temperatura del aire en °C para caso 10

En cuanto a la temperatura radiante media, en comparación con el caso en el que no existe medida de confinamiento – caso 8 -, se obtiene una distribución muy similar. La gráfica comparativa siguiente deja ver la leve mejora que supone incluir una medida de confinamiento cuando se trabaja con enfriamiento evaporativo doble y cobertura solar.

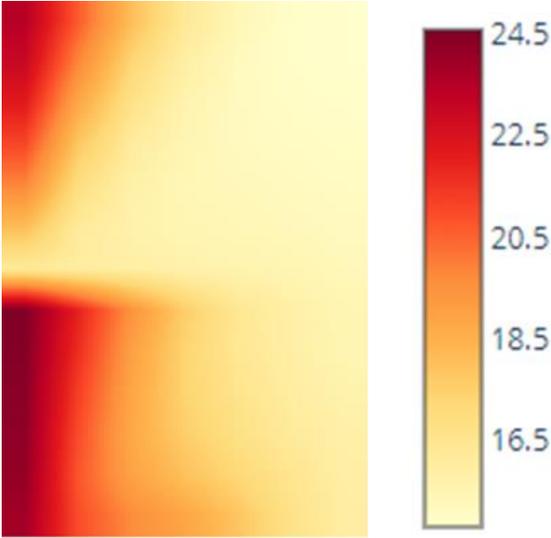


Imagen 53. Distribución de temperatura radiante en °C para caso 10

La instalación de la estrategia de confinamiento, como puede apreciarse en la gráfica siguiente, no supone una mejora significativa para las horas de ocupación del espacio, excepto a las 13:00 horas, donde la temperatura radiante es de media un grado menor.

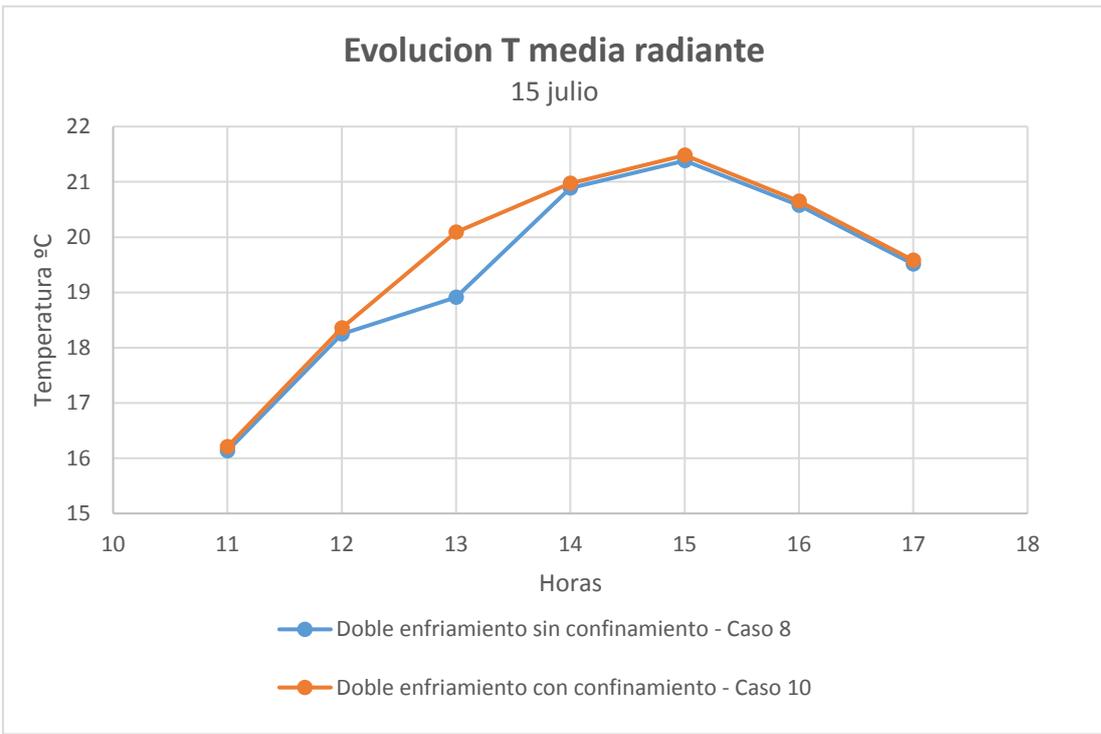


Imagen 54. Comparativa de evolución de temperatura radiante en °C para casos 8 y 10.

De nuevo, el uso de la estrategia de confinamiento mejora la tasa de sudoración en la zona oeste del espacio, pero en términos generales no se aprecia un aumento significativo del confort en el patio.

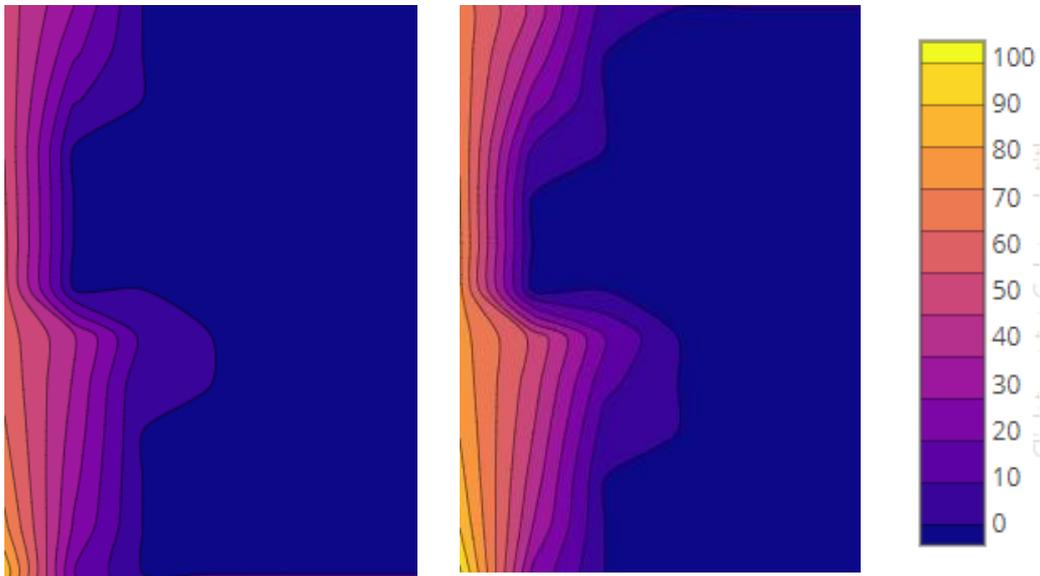


Imagen 55. Comparativa de distribución de tasa de sudoración en gr/h en el patio para caso 8 y 10. En cuanto a la aportación de agua que requiere esta estrategia de doble enfriamiento, cuando el patio tiene elementos de confinamiento, correspondiente al caso 8, el caudal de agua que hay que aportar para enfriar el aire se dobla para algunas horas del día (para conseguir sólo una reducción media de 21,2 gr/h en la tasa de sudoración en la parte oeste del espacio). El uso de confinamiento en este caso no estaría justificado por el coste que supone, no solo el aumento de caudal de agua de aportación, sino también la inversión en instalar la estrategia de confinamiento.

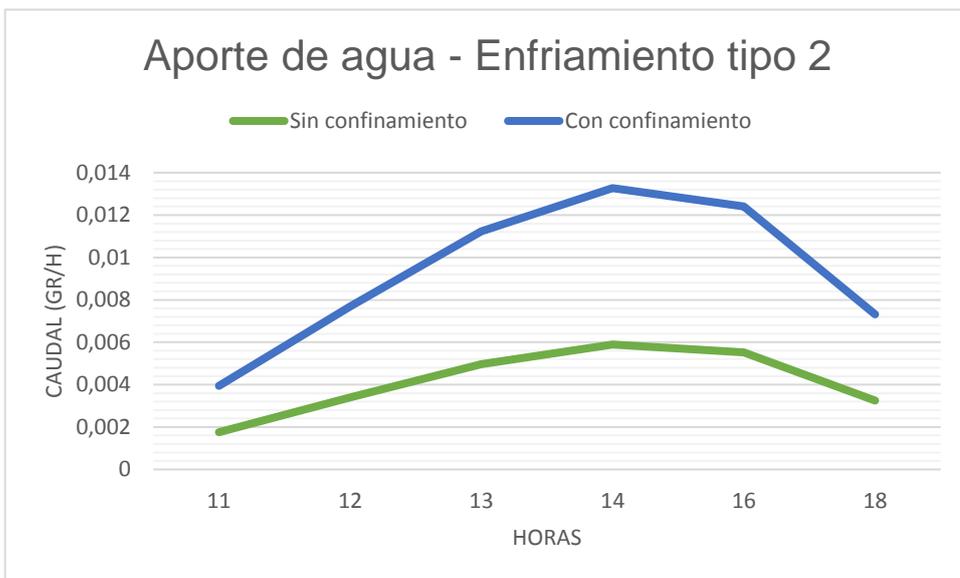


Imagen 56. Comparativa de aporte de caudal de agua para enfriamiento tipo 1 casos 8 y 10 en g/h.

6. Conclusiones generales

Como se ha ido planteando durante el estudio de los distintos casos, los valores de la temperatura radiante media y la tasa de sudoración serán los criterios que se utilicen para escoger la combinación de medidas más conveniente. La combinación idónea atenderá a criterios, no sólo de confort térmico, sino también a razones económicas y constructivas.

Se ha demostrado que las medidas de confinamiento ofrecen una mejora despreciable en las condiciones de confort en el patio, por lo que una solución aceptable sería descartarlas.

En la gráfica siguiente se recogen los valores medios, para cada caso, de las variables de confort, en el día 15 de julio a las 12:00.

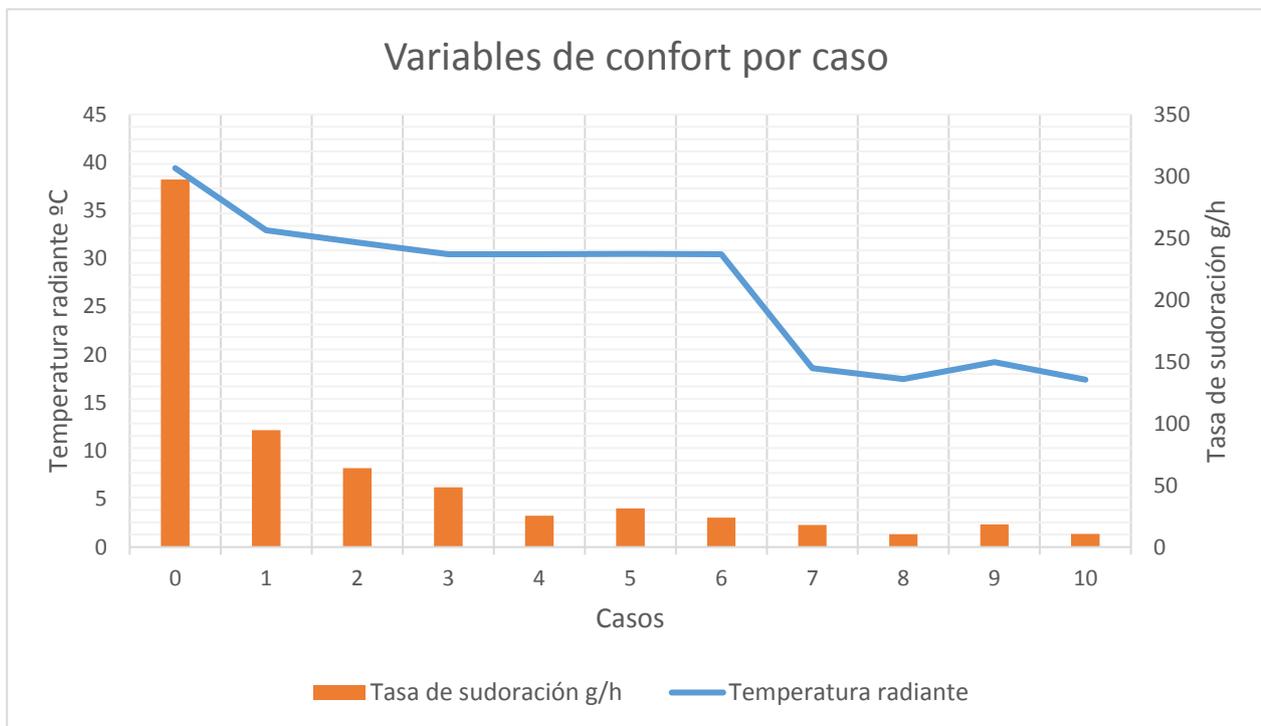


Imagen 57. Comparativa de variables de confort por caso

En la gráfica pueden distinguirse dos cambios claros de tendencia:

- Reducción de la temperatura radiante media en el caso 1 gracias a la instalación de cobertura solar, así como en la tasa de sudoración, la cual es más evidente.
- Reducción drástica de la temperatura radiante debido a la instalación del enfriamiento evaporativo tipo 1.

índices y distribución de la tasa de sudoración, pero no suficiente como para tenerla en consideración.

La importancia de la velocidad del aire para el confort térmico se demuestra en el gráfico que aparece a continuación, para pruebas experimentales realizadas: para temperaturas del aire de 28, 30 y 32 grados, a medida que aumenta las velocidades del aire, de 0.5 a 2 m/s, el peso del agua evaporado va disminuyendo, ya que se requiere menos pérdida de calor por transpiración como consecuencia del aumento de transferencias de calor corporal por convección. En efecto, y tal y como han reflejado los resultados, valores mayores de viento y menores temperaturas radiantes darán como resultado una menor tasa de sudoración.

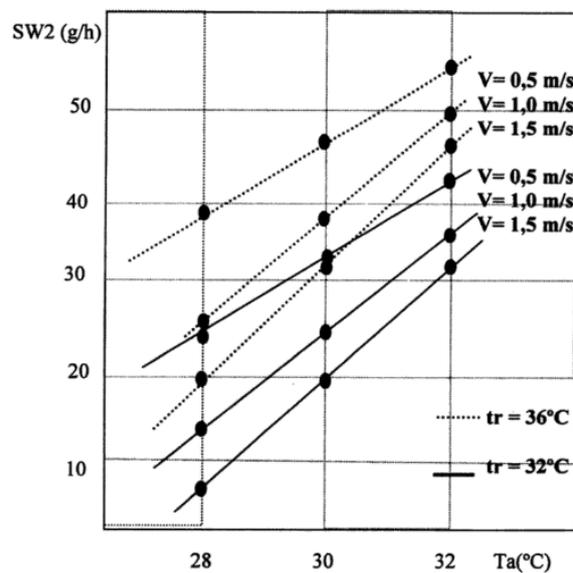


Imagen 57. Evolución de la tasa de sudoración sobre caso real con la velocidad del aire y la temperatura (Francis Allard, 1993)

7. Referencias bibliográficas

- Angelica Ruiz, E. N. (2009). *Confort térmico en espacios abiertos. Comparación de modelos y su aplicabilidad en ciudades de zonas áridas*.
- ASHRAE. (n.d.). *ASHRAE Fundamentals Chapter 8, Thermal Comfort*.
- Energía, I. I. (2012). *Ahorro y recuperación de energía en instalaciones de climatización*. Madrid.
- F. Baret, B. A. (1994). Interet du moyen infrarouge reflectif pour caracteriser la vegetation. Societé Française pour la Photogrametrie .
- Francis Allard, M. E. (1993). *CONCEPTO DE CONFORT TÉRMICO Y PREDICCIÓN DEL COMPORTAMIENTO EÓLICO DE EDIFICACIONES*.
- Holmér, I. (1984). *Required clothing insulation (IREQ) as an analytical index of cold stress, 90(1B), 1116-1128*. (A. Transactions, Ed.)
- Irina Tumini, A. P. (2015). *Aplicación de los sistemas adaptativos para la evaluación del confort térmico en espacios abiertos, en Madrid*. Madrid.
- Jara, E. Á. (2017). *CARACTERIZACIÓN DE LOS MECANISMOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR Y MASA EN ESPACIOS ABIERTOS PARA LA EVALUACIÓN DEL CONFORT TÉRMICO Y DE LA INFLUENCIA EN EL COMPORTAMIENTO TÉRMICO DEL EDIFICIO* . Cadiz.
- McCullough, E. (1986). *An insulation data base for military clothing*. (I. f.-0. Kansas State University, Ed.) Manhattan.
- McCullough, E., Jones, B., & Tamura, T. (1989). *A data base for determining the evaporative resistance of clothing, 95(2)*. ASHRAE Transactions.
- Michael J Morgan, H. N. (1987). *Fundamentos de Termodinámica Técnica*.
- Nishi, Y., González, R., & Gagge, A. (1975). *Direct measurement of clothing heat transfer properties during sensible and insensible heat exchange with thermal environment, 81(2), 183*. ASHRAE Transactions.
- Stull. (2000). *Meteorology for Scientists and Engineers 2nd. edition*. Brooks/Cole.
- Torada, P. M. (1995). *Ergonomía 2. Confort y estrés térmico*. Barcelona.
- Umbach, K. (1980). *Measuring the physiological properties of textiles for clothing. (G1), 543-548*. Melliand Textilberichte (English edition).
- Vaughan, J. a. (2012). *Remote Sensing of Vegetation: Principles, Techniques, and Applications* by Hamlyn G. In *The Quarterly Review of Biology* (pp. 165-166).

