

Proyecto Fin de Carrera
Grado en Ingeniería de la Energía

Diseño de zonas de estancias exteriores en confort
térmico en Vélez-Málaga

Autor: Anna Venslavskaya

Tutores: María del Carmen Guerrero Delgado, José Sánchez Ramos

Dep. Ingeniería Energética
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2024



Proyecto Fin de Carrera
Grado en Ingeniería de la Energía

Diseño de zonas de estancias exteriores en confort térmico en Vélez-Málaga

Autor:
Anna Venslavskaya

Tutor:
María del Carmen Guerrero Delgado
Profesor titular

Dep. de Ingeniería Energética
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla
Sevilla, 2024

Proyecto Fin de Carrera: Diseño de zonas de estancias exteriores en confort térmico en Vélez-Málaga

Autor: Anna Venslavskaya

Tutor: María del Carmen Guerrero Delgado

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2024

El Secretario del Tribunal

A mis amigos, quienes han vivido conmigo esta experiencia y me han apoyado siempre, a mis profesores de Málaga y Sevilla.

Agradecimientos

Quisiera expresar mi más sincero agradecimiento a todas las personas que me han acompañado en este importante proceso. A mis amigos, que han recorrido este camino conmigo y siempre me han brindado su constante apoyo y motivación. A mis profesores, por compartir sus conocimientos con nosotros, por hacernos las clases más amenas y por enseñarnos la ilusión por lo que estamos estudiando. Y finalmente, a mi perro Richi, que estuvo conmigo desde el colegio, pero lamentablemente no ha podido acompañarme en este último año.

Anna Venslavskaya

Sevilla, 2024

Resumen

Este proyecto se centra en la rehabilitación energética y el análisis del confort térmico de las personas en tres estancias situadas en el paseo marítimo de Torre del Mar. Las estancias seleccionadas incluyen un parque infantil, una plaza, y una zona de paso, todas ubicadas en un entorno urbano al aire libre.

El objetivo principal es analizar cómo las condiciones climáticas y las características arquitectónicas de estas áreas afectan al confort de las personas que las usan. Para ello, se ha llevado a cabo un estudio detallado de la temperatura de superficie, radiación solar incidente, temperatura del aire, entre otros datos que se exponen en este trabajo para cada una de las estancias. Estos datos se han integrado en un motor de cálculo que ha proporcionado el departamento de termotecnia de la universidad de Sevilla, que permite evaluar la eficiencia y el confort térmico en diferentes condiciones ambientales, en este caso se evaluarán los meses de verano.

El proyecto también propone mejoras para optimizar el confort de los usuarios, como la incorporación de elementos que proporcionen sombra, elementos naturales que absorben el calor y materiales para el suelo con alta reflectancia solar. Las conclusiones obtenidas buscan servir de base para futuras intervenciones urbanas en entornos similares, promoviendo un diseño urbano más sostenible y orientado al bienestar de las personas.

Abstract

This project focuses on energy rehabilitation and the analysis of people's thermal comfort in three research areas located on the Torre del Mar promenade. The selected areas include a playground, a concert square, and a passage area, all located in an urban outdoor environment.

The main objective is to analyse how the climatic conditions and architectural characteristics of these areas affect the comfort of the people who use them. To this end, a detailed study of the surface temperature, incident solar radiation, air temperature, among other data that is presented in this work for each of the rooms, has been carried out. These data have been integrated into a calculation engine provided by the thermotechnics department of the University of Seville, which allows evaluating efficiency and thermal comfort in different environmental conditions, in this case the summer months will be evaluated.

The project also proposes improvements to optimize user's comfort, such as the incorporation of elements that provide shade, natural elements that absorb heat and floor materials with high solar reflectance. The conclusions obtained seek to serve as a basis for future urban interventions in similar environments, promoting a more sustainable urban design oriented to the well-being of people.

Índice

Agradecimientos	9
Resumen	11
Abstract	13
Índice	14
Índice de Tablas	16
Índice de Figuras	17
Notación	19
1 Introducción	21
1.1 <i>Excesivo consumo energético por falta de medidas de eficiencia</i>	22
1.2 <i>El efecto de Isla de calor en las ciudades</i>	23
1.2.1 Causas del efecto Isla de Calor	23
1.2.2 Materiales con bajo Albedo	24
1.2.3 Concentración de Personas	24
1.2.4 Aumento del uso de aire acondicionado	25
1.2.5 Destrucción de Árboles	25
1.2.6 Contaminantes del Aire	25
1.2.7 Bloqueo del Viento	26
1.2.8 Dosel Urbano	26
1.3 <i>Confort Térmico</i>	26
1.3.1 Parámetros y Factores de confort	28
1.3.2 Carga Térmica (Q)	29
1.3.3 PET	30
1.4 <i>Estrategias actuales para afrontar las problemáticas descritas</i>	30
1.4.1 Reducción del Albedo en pavimentos urbanos	31
1.4.2 Materiales reflectores para el pavimento	31
1.4.3 Zonas verdes en el entorno urbano y en la edificación	32
1.4.4 Sombra en edificios	33
1.4.5 Cubiertas verdes	33
1.4.6 Reducción del calor antropogénico	34

1.4.7	Alta densidad urbana	34
1.4.8	Incorporación de elementos de agua	35
1.5	<i>Objetivos</i>	35
2	Metodología	36
2.1	<i>Clima del estudio</i>	39
2.1.1	Situación Geográfica	40
2.2	<i>Estudio de los casos</i>	41
2.2.1	Caso 1	41
2.2.2	Caso 2	47
2.2.3	Caso 3	50
2.5	<i>Resultados</i>	53
2.5.1	Caso 1	53
2.5.2	Caso 2	54
2.5.3	Caso 3	55
2.5.4	Discusión general de resultados	56
3	Conclusiones y Líneas futuras	57
3.1	<i>Conclusiones</i>	57
3.2	<i>Líneas Futuras</i>	58
4	Anexos	59
4.1	<i>Resultados caso 1</i>	59
4.2	<i>Resultados del caso 2</i>	63
4.3	<i>Resultados del caso 3</i>	66
	Referencias	68

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Valores de carga térmica para distintos tipos de actividad.	29
Tabla 2: Valores del PET para distintos escenarios. [18]	30
Tabla 3: Datos de reflectancia y absortancia para diferentes materiales y pinturas de paredes	31
Tabla 4: Resultados de la simulación del caso base 1 para las 16:00h	60
Tabla 5: Resultados de la simulación del caso mejorado 1 para las 16:00h.	62
Tabla 6: Resultados de la simulación del caso base 2 para las 16:00h	64
Tabla 7: Resultados de la simulación del caso mejorado 2 para las 16:00h	65
Tabla 8: Resultados de la simulación del caso base 3 para las 16:00h.	66
Tabla 9: Resultados de la simulación del caso base 3 para las 16:00h.	67

ÍNDICE DE FIGURAS

Ilustración 1: Causas del efecto de la isla de calor.	24
Ilustración 2: Gradiente del albedo.	24
Ilustración 3: Muestra gráfica de la variación de temperatura en la ciudad de Granada y alrededores rurales .	25
Ilustración 4: Simulación de trayectoria del viento en un entorno urbano	26
Ilustración 5: Escala PMV	27
Ilustración 6: Parámetros de los cuales depende el Confort	28
Ilustración 7: Ejemplo de Temperatura radiante media y superficial en el caso 2.	29
Ilustración 8: Ejemplo de inclusión de espacios verdes en áreas urbanas	32
Ilustración 9: Morera en el Instituto Liceo Caracense (foto Catálogo de árboles singulares.- Asociación Micorriza)	33
Ilustración 10: Ejemplo de cubierta vegetal en edificio.	34
Ilustración 11: Fotografía del catastro del emplazamiento de la ciudad.	40
Ilustración 12: Fotografía aérea de Google maps del caso de estudio 1, parque de niños	41
Ilustración 13: Vista de planta del suelo actual del parque de niños.	42
Ilustración 14: Resultado de temperaturas superficiales del mallado del estudio inicial.	42
Ilustración 15: Resultados del índice PET	43
Ilustración 16: Comparación del suelo del caso 1, a la izquierda el antiguo y a la derecha el nuevo	44
Ilustración 17: Composición de materiales en el nuevo pavimento del caso 1.	45
Ilustración 18: A la izquierda, el antiguo pavimento con un $\alpha=0.7$, a la derecha el nuevo con un $\alpha=0.3$	45
Ilustración 19: Toldos a utilizar para el proyecto	46
Ilustración 20: Ala izquierda, fotografía aérea de Google maps del caso de estudio 2, a la derecha vista real de la plaza de conciertos.	47
Ilustración 21: Resultados de temperaturas superficiales del caso base 2.	48
Ilustración 22: Resultados del parámetro PET para el caso base 2.	48
Ilustración 23: A la izquierda, vista aérea desde Google maps, a la derecha vista real de la zona de paso	50
Ilustración 24: Resultados de las temperaturas de junio del caso base 3 a las cuatro de la tarde.	51

Ilustración 25: Resultados del parámetro PET del caso base 3.	51
Ilustración 26: Comparación de los resultados de la mejora con el caso base para las temperaturas superficiales.	53
Ilustración 27: Comparación del resultado de la mejora con el caso base 1 para el análisis del PET.	54
Ilustración 28: Comparación de los resultados de la mejora con el caso base 2 para las temperaturas superficiales.	54
Ilustración 29: Comparación del resultado de la mejora con el caso base 2 para el análisis del PET.	54
Ilustración 30: Comparación de los resultados de la mejora con el caso base 3 para las temperaturas superficiales.	55
Ilustración 31: Comparación del resultado de la mejora con el caso base 3 para el análisis del PET.	55
Ilustración 32: Nebulizadores para el caso 2.	58

Notación

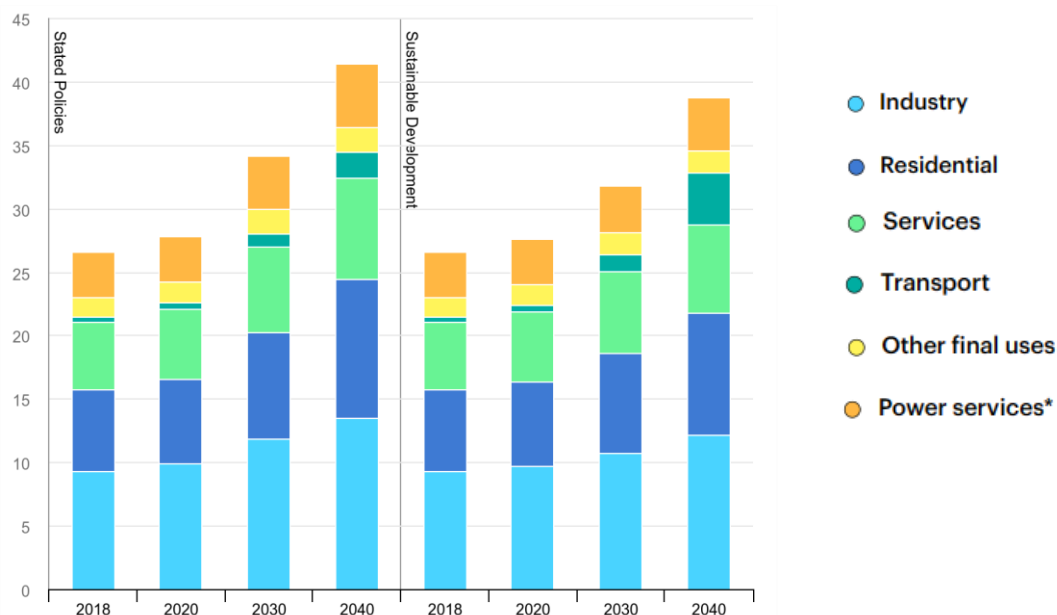
ASHRAE	American Society Of Heating, Refrigerating And A-C Engineers
ICU	Isla de Calor Urbano
IFAPA	Instituto Andaluz de Investigación y Formación Agraria, Pesquera, Alimentaria y de la Producción Ecológica
INE	Instituto Nacional de Estadísticas
ISO	Internacional Organization for Standardization
PET	Physiological Equivalent Temperature
PMV	Predicted average vote
UNE	Una Norma Española

1 INTRODUCCIÓN

El cambio climático es un problema moral, ético y económico que no puede ser abordado sin una transformación radical en la forma en que producimos y consumimos energía

- James Hansen -

En lo que respecta a la evolución energética, se está experimentando una subida del consumo de la energía a nivel global, a consecuencia de un aumento de la industria y la actividad humana. La necesidad de acondicionar todas las instalaciones, entre las que se encuentran los edificios residenciales y el crecimiento de las economías emergentes. Esta tendencia hacia un aumento en el consumo de energía plantea desafíos significativos en términos de sostenibilidad y seguridad energética. En la actualidad, es menester señalar que el planeta se encuentra en un punto crítico donde es urgente adoptar medidas para garantizar un futuro al medio ambiente y por ello se necesita un suministro de energía renovable, constante y eficiente. En este contexto, la transición hacia fuentes de energía renovable y la implementación de tecnologías más eficientes se han convertido en prioridades clave, sobre todo mirando por medidas que permitan ahorrar naturalmente el consumo de energía. Además, la conciencia sobre la importancia de la conservación de energía y el uso de prácticas más responsables se ha vuelto fundamental para abordar los desafíos del cambio climático y promover un desarrollo sostenible a nivel mundial. En este sentido, explorar nuevas estrategias y promover la innovación en el sector energético son aspectos esenciales para construir un futuro más equitativo y ambientalmente consciente. [1]



Gráfica 1: Previsiones de consumo de energía eléctrica hacia el 2040 según las medidas tomadas para mitigar el consumo [1]

1.1 Excesivo consumo energético por falta de medidas de eficiencia

Según los datos más recientes, en España los edificios consumen el 29,5% de la energía final[2]. La deficiente calidad de la construcción convierte las residencias españolas en auténticos sumideros por donde escapa la energía. Es esencial abordar esta ineficiencia energética para transformar los hogares en verdaderos refugios, capaces de proteger de los diferentes climas de este país. Para abordar este problema, es necesario examinar de manera integral todo el parque de viviendas. Hasta ahora, la normativa sobre eficiencia energética ha estado centrada principalmente en los edificios recién construidos, los cuales representan solo una fracción mínima del total de viviendas, subrayando así la importancia de enfocarse en la rehabilitación energética como medida para mitigar la pobreza energética en España.

Este enfoque cobra aún más relevancia si consideramos que el 11,6% de los consumidores españoles expresan insatisfacción con la temperatura de sus hogares en invierno y el 15,3% en verano. La rehabilitación energética no solo salvaguarda la salud, sino que también tiene un impacto directo en la economía al reducir el gasto mensual en facturas de servicios públicos y aumentar el valor de las propiedades.[2]

El esfuerzo regulatorio de los últimos años resalta la importancia del año de construcción como un factor crucial al evaluar la ineficiencia energética de los edificios. En España, más de la mitad del parque inmobiliario fue construido antes de que se implementaran las regulaciones que exigían un nivel mínimo de aislamiento térmico. Este hecho refuerza aún más la idea de que la rehabilitación energética representa una gran oportunidad para reducir el consumo energético en los hogares, no solo en calefacción sino también en refrigeración pues no hace falta hacer mención a las temperaturas que se pueden alcanzar en verano y que en ocasiones suponen un riesgo para la vida si se exponen a ellas durante las horas más calurosas. [3]

Según el informe elaborado por el Gobierno en diciembre de 2021 [4], se revela que, de los certificados emitidos para edificios existentes, 4.116.398 obtuvieron una calificación "E" o inferior, mientras que únicamente 300.847 alcanzaron una categoría "C" o superior. Para cumplir con los compromisos climáticos y objetivos de la Unión Europea, España debe intensificar la rehabilitación energética de su parque inmobiliario.

Hay que destacar que, para maximizar la reducción del consumo energético en el parque inmobiliario, es necesario enfocarse en la rehabilitación integral, que incluye medidas como cambios en la envolvente del edificio, en lugar de acciones más superficiales de eficiencia energética, que han sido predominantes en España hasta ahora.

En otro informe [5], se observa que solo el 19,8% de los hogares ha llevado a cabo alguna medida de rehabilitación energética. Cuando se les preguntó por qué no realizaron tales mejoras, el 35,3% citó razones económicas. Sorprendentemente, a pesar de las ayudas disponibles para estas intervenciones, que continúan siendo desconocidas para el 60,9% de la población.

La situación de España actualmente es nefasta, la pobreza energética ha alcanzado proporciones alarmantes en los últimos años, exacerbada por factores como el desempleo, la precariedad laboral y la falta de viviendas adecuadamente acondicionadas. Según datos del Instituto Nacional de Estadística (INE) se estima que, entre 3,5 y 8,1 millones de personas, en función del indicador utilizado, se encuentran en situación de pobreza energética en España [6].

Las consecuencias de la pobreza energética son diversas y van más allá de la esfera económica, los edificios de la Unión Europea son responsables del 40% del consumo de energía y del 36% de las emisiones de gases de efecto invernadero.

1.2 El efecto de Isla de calor en las ciudades

Con todo este contexto, también se debe que mencionar que la organización de las ciudades influye en el gasto energético, en el confort térmico y en la salud de las personas. La mayoría de ellas se han ido construyendo a lo largo de los siglos conforme han ido creciendo y hasta hace no mucho, no se tenía que resolver cuestiones de espacio para las personas. Con el aumento de población y la necesidad de nueva vivienda, las construcciones que antes estaban más enfocadas a ser horizontales empezaron a construirse verticalmente y a tener mayor densidad de población. Para solucionar este problema se necesitó desarrollar nuevos materiales que proporcionasen una construcción rápida, resistente y duradera, como el cemento y el asfalto, que tienen una alta capacidad calorífica. Hasta el día de hoy, dichos materiales, viviendas y la organización de las ciudades siguen siendo las mismas, pero ahora se están viviendo las consecuencias de esto.

En la mayoría de las grandes ciudades, se observa que la temperatura en el centro de la ciudad es más alta que en sus alrededores o áreas suburbanas. Este fenómeno se conoce como efecto de isla de calor urbano (ICU). Debido a este efecto hay incomodidad entre los habitantes de la ciudad. Como se ha mencionado antes, este efecto ocurre cuando una gran cantidad de tierra natural es reemplazada por superficies artificiales que absorben la radiación solar incidente y lo re-radian por la noche. Desgraciadamente, este fenómeno existe en casi todas las grandes ciudades ya que no han seguido un plan arquitectónico a la hora de expandirse pues en otros tiempos no se tenía este conocimiento.

Además del disconfort de los habitantes, esto afecta a la demanda de electricidad, que aumenta entre un 2-4% por cada aumento de 1°C en la temperatura [7]. En una típica área urbana, las superficies son más oscuras y hay menor vegetación que en sus alrededores. La diferencia de temperatura de una ciudad típica con sus áreas rurales circundantes puede ser de hasta 2.5°C en un día cálido de verano, lo que puede causar un aumento adicional del 5-10% en la demanda máxima de electricidad municipal. Sin embargo, en la temporada de invierno, debido al frío en el ambiente, el efecto ICU juega un papel positivo para los habitantes de la ciudad al proporcionarles aire cálido.

1.2.1 Causas del efecto Isla de Calor

A parte de las causas ya mencionadas, existen más factores responsables de este efecto que se detallaran a continuación, incluyendo la liberación de calor antropogénico, la cobertura de la superficie, las condiciones climáticas y los contaminantes del aire. Bajo las condiciones adecuadas, la diferencia de temperatura puede ser de hasta 10-15°C. Como consecuencia del microclima creado por la ICU, aumenta la demanda de energía por refrigeración de los edificios. Además, para satisfacer la demanda, se necesita generar más energía, lo que resulta en un aumento de la emisión de gases de efecto invernadero y el deterioro del clima y se convierte en un círculo que se retroalimenta [8].

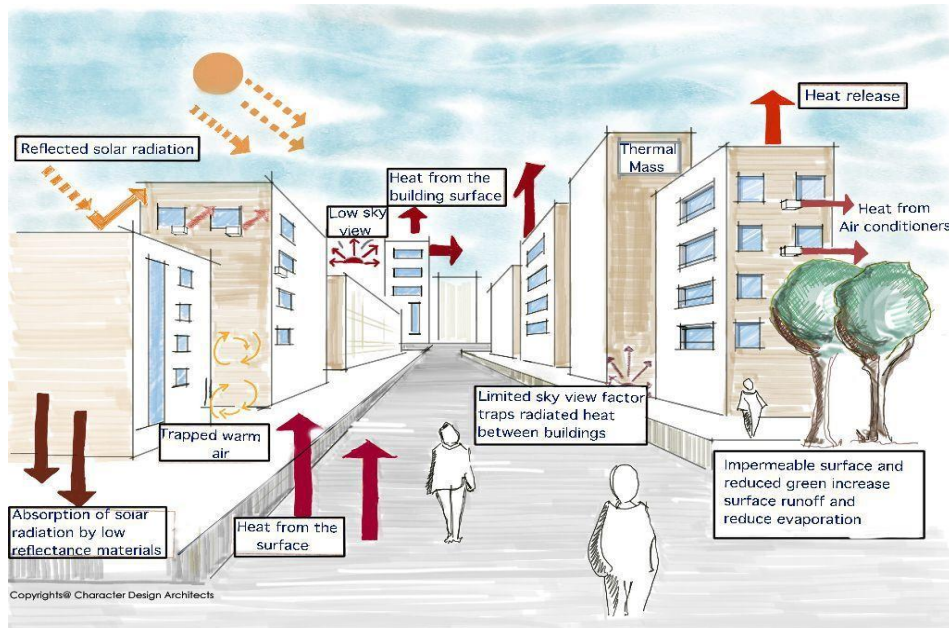


Ilustración 1: Causas del efecto de la isla de calor.

1.2.2 Materiales con bajo Albedo

El albedo es la relación entre la energía solar reflejada y la energía solar incidente. Depende de la disposición de las superficies, materiales, pavimentos, recubrimientos, etc. Tiene una influencia directa en la formación del microclima. Este varía según varios factores, como la orientación de las superficies, la heterogeneidad, y los materiales para techos y pavimentos. Si el albedo de la superficie urbana es bajo, almacenará más energía solar y aumentará la temperatura urbana, creando así un microclima.

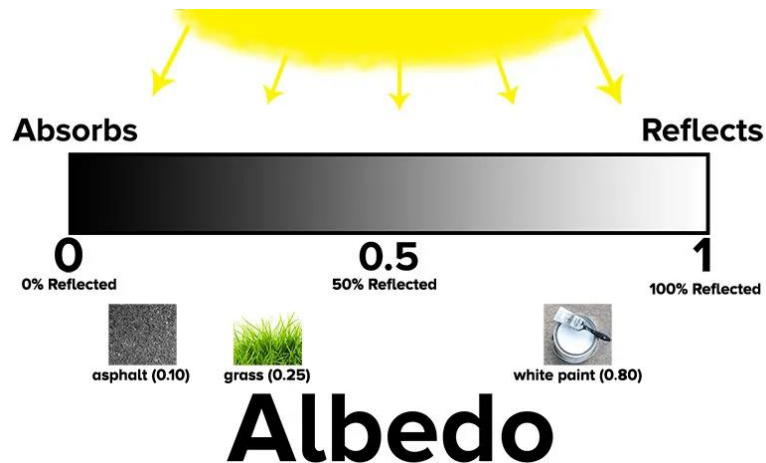


Ilustración 2: Gradiente del albedo.

1.2.3 Concentración de Personas

Dado que la concentración de personas es alta en los centros de las ciudades, debido a la disponibilidad de diversas facilidades, la emisión de CO₂ también es considerable en estas áreas. El CO₂ almacena calor, lo que provoca un aumento de la temperatura atmosférica. El efecto final es que contribuye significativamente a la formación de ICU.

1.2.4 Aumento del uso de aire acondicionado

Para proporcionar confort a las personas durante el verano, el uso de aire acondicionado ha aumentado considerablemente. Los aires acondicionados mantienen fresco el interior de un edificio, pero liberan el calor absorbido hacia el exterior. Como consecuencia, el ambiente exterior se calienta, lo que provoca un aumento de la temperatura atmosférica.

1.2.5 Destrucción de Árboles

Para satisfacer la demanda de las instalaciones urbanas, se eliminan los bosques de la zona a gran escala. Uno de los usos más comunes de la vegetación en entornos urbanos es, sin duda, el control de la radiación solar. Su función más evidente es la de proporcionar sombra; sin embargo, la vegetación también genera efectos menos obvios sobre la radiación solar. Del 100% de la energía solar que incide sobre las plantas, estas absorben entre un 5% y un 20% para la fotosíntesis, reflejan entre un 5% y un 20%, disipan entre un 20% y un 40% por evapotranspiración, emiten entre un 10% y un 15%, y transmiten entre un 5% y un 30% [9]. Con la destrucción de la vegetación, la eficiencia del sistema de enfriamiento disminuye drásticamente. Recientemente se ha llevado un estudio en la Universidad de Granada acerca de la variación de temperatura entre el entorno urbano y el rural para estudiar los motivos de ello[10], como se puede observar en la siguiente ilustración, es notable la diferencia entre áreas urbanas y campestres, factor importante que influye en estas últimas, es que tienen una gran concentración de vegetación, entre otras causas influyentes.

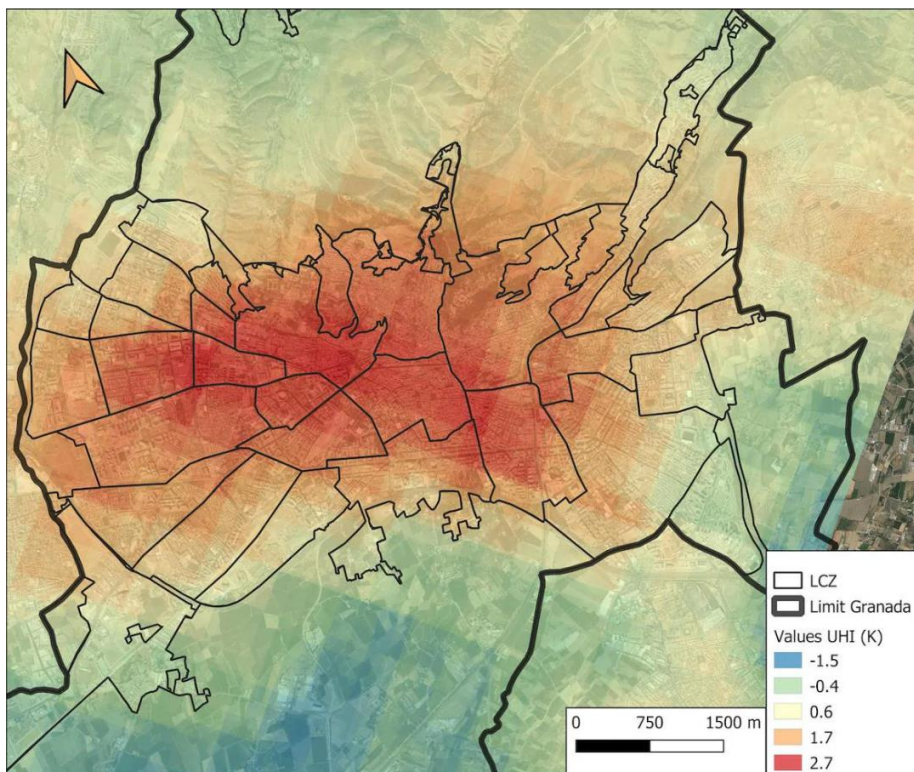


Ilustración 3: Muestra gráfica de la variación de temperatura en la ciudad de Granada y alrededores rurales .

1.2.6 Contaminantes del Aire

En las áreas urbanas, especialmente en los centros de las ciudades, la contaminación del aire es evidente. Los gases de escape de los vehículos y los contaminantes industriales liberados en el ambiente atrapan la radiación solar. Esto provoca un aumento de la temperatura y favorece la creación de un microclima.

1.2.7 Bloqueo del Viento

En entornos urbanos con alta densidad de edificaciones, el viento a nivel del suelo está determinado principalmente por la configuración urbana, como la anchura de las calles, la altura de los edificios, la continuidad y orientación del trazado urbano, así como las variaciones en la altura de las construcciones. Como resultado, disminuye el efecto de enfriamiento por convección. Esto impide que el calor atrapado se disperse, intensificando así el efecto.

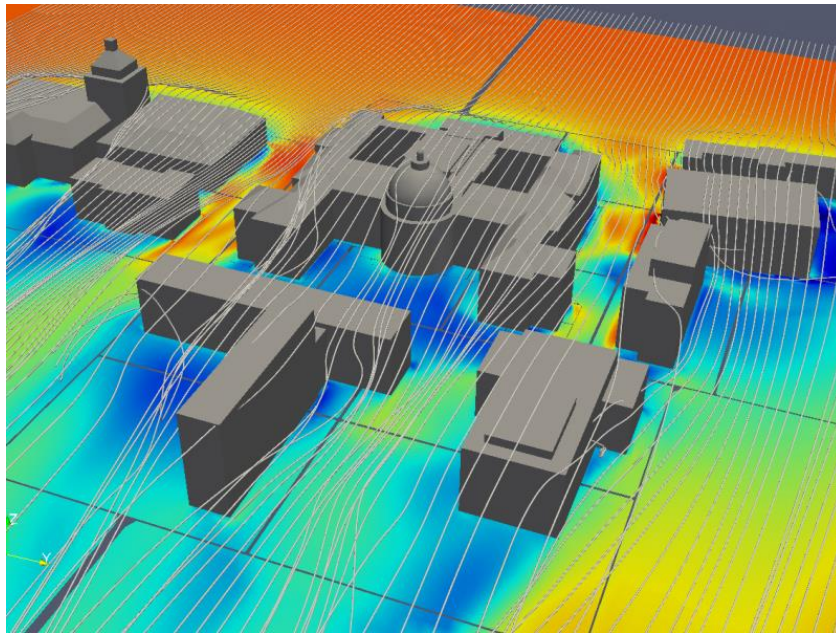


Ilustración 4: Simulación de trayectoria del viento en un entorno urbano

1.2.8 Dosel Urbano

En las áreas urbanas, existen edificios de distintas alturas y generalmente el calor reflejado por un edificio queda atrapado por los edificios más altos cercanos, lo que se conoce como dosel urbano. La formación de este dosel urbano incrementa el ICU.

1.3 Confort Térmico

El confort térmico es, por tanto, uno de los elementos más importantes en la relación con la estimación de la calidad del ambiente interior, y ha sido definido en paralelo por la Norma 55 de ASHRAE (Sociedad Americana de Ingenieros de Calefacción, Refrigeración y Aire Acondicionado) [11] y la Norma 7730 de ISO (Organización Internacional de Normalización)[12] como “ *la condición de la mente en la que se expresa satisfacción con el ambiente térmico* ” [11]. Por tanto, la primera condición de confort térmico es la neutralidad térmica, lo que significa que la persona no se siente demasiado calurosa, ni demasiado fría [13].

En las últimas tres décadas, este concepto ha adquirido gran relevancia en el diseño y construcción de viviendas, impulsado por los avances en ingeniería y en los sistemas de aire acondicionado y climatización. Las implicaciones sociales y el impacto en el consumo energético que esto genera exigen un análisis y reinterpretación de los estilos de vida tradicionales en regiones de clima tropical, y la búsqueda de soluciones vinculadas directamente con la arquitectura bioclimática. Un claro ejemplo son los edificios con ventilación natural, que no solo proporcionan confort a sus ocupantes y reducen el consumo energético, sino que también están profundamente ligados a la cultura, ofreciendo una visión particular de la relación entre los espacios interiores y exteriores.[14]

Además de los aspectos bioclimáticos, es crucial mencionar las teorías de Fanger, basadas en experimentos realizados con 1296 jóvenes en cámaras térmicas, utilizando modelos estáticos de transferencia de calor. En estos estudios, se analizaron factores como la vestimenta y la actividad de los participantes, quienes fueron expuestos a distintos entornos térmicos. Los sujetos evaluaron su percepción del calor y el frío utilizando los siete puntos de la escala de sensación térmica de ASHRAE, que va desde (-3) hasta (+3), donde los valores negativos indican sensación de frío, los positivos de calor, y el valor 0 corresponde a una sensación térmica neutral. Además, en otra fase del estudio, los participantes ajustaron las condiciones térmicas ambientales hasta alcanzar su confort.[15]

Se creó el término el voto medio previsto (PMV), que es el valor medio de los votos según la escala de sensaciones térmicas. Expresa la opinión de un número de personas hacia el entorno en el que se encuentran (normalmente una larga estancia).

El modelo de Fanger combina teorías de balance térmico con la fisiología y la termorregulación para definir un rango de temperaturas en las que los ocupantes de un edificio se sienten confortables. Según estas teorías, el cuerpo humano emplea procesos fisiológicos como la sudoración, el temblor y la vasodilatación para mantener el equilibrio térmico entre el calor generado por el metabolismo y la pérdida de calor a través del cuerpo. Mantener este equilibrio es fundamental para lograr una sensación térmica neutral. No obstante, Fanger observó que el sistema termorregulador humano es tan eficiente que puede mantener este equilibrio térmico dentro de un amplio rango de variables ambientales, incluso cuando no se experimenta confort pleno. [15]

Como podemos ver en la siguiente ilustración:

PMV	SENSACIÓN TÉRMICA
+3	Muy caluroso
+2	Caluroso
+1	Ligeramente caluroso
0	Neutro
-1	Ligeramente fresco
-2	Fresco
-3	Frio

Ilustración 5: Escala PMV

1.3.1 Parámetros y Factores de confort

Los parámetros de confort son las condiciones específicas del entorno que influyen en las sensaciones de los ocupantes. Se considera que estas condiciones pueden cambiar según el tiempo y el espacio, y se pueden clasificar en:

Parámetros del Confort		
Parámetros Ambientales	Temperatura del aire Humedad relativa Velocidad del aire Temperatura radiante Radiación solar Niveles de ruido	Todos tienen variabilidad temporal y espacial
Parámetros Arquitectónicos	Adaptabilidad del espacio Contacto visual y auditivo	

Ilustración 6: Parámetros de los cuales depende el Confort

Los parámetros ambientales son de gran relevancia y, posiblemente, los más estudiados, ya que, al ser medibles, se han establecido rangos y valores estándar que permiten mantener condiciones de bienestar para los individuos. Su influencia directa en las sensaciones de las personas y en las características físicas y ambientales de un espacio es evidente, sin depender necesariamente del uso o las actividades que se desarrollen en dicho lugar. Se definen los parámetros ambientales como, la temperatura del aire, la temperatura de radiación, el movimiento del aire y la humedad. [16]

Para este estudio se han escogido, de entre todos los parámetros, la temperatura del aire, la temperatura radiante media, la temperatura superficial, la temperatura psicológica equivalente (Physiological Effective Temperature PET) y la carga térmica (Q), que se detallarán a continuación.

1.3.1.1 La Temperatura del Aire

La temperatura del aire hace referencia específicamente al estado térmico del aire a la sombra. Es un factor clave, ya que para determinar si las personas perciben frío o calor en un lugar, es fundamental disponer de datos de temperatura. Estos datos se comparan con gráficas preestablecidas que permiten estimar, con un alto grado de fiabilidad, las zonas en las que la mayoría de las personas se sentirían cómodas. Además, estos datos permiten evaluar si un espacio o una vivienda en su conjunto se mantiene dentro de rangos térmicos adecuados.

1.3.1.2 Temperatura Radiante Media

Es definida como la temperatura media irradiada por las superficies envolventes de un espacio a su interior. Dado que el calor por radiación se transfiere cuando existen diferencias de temperatura, generalmente desde un cuerpo caliente hacia uno frío, la temperatura radiante de las paredes, el suelo y el techo de una habitación puede influir en la sensación térmica de sus ocupantes, independientemente de la temperatura del aire en su interior. Extrapolando esto al exterior, es importante tener en cuenta la temperatura a la que se encuentran las superficies circundantes, ya que, como bien se explicó antes, las superficies de los materiales en las ciudades suelen ser oscuras y atrapar mucho más el calor, esto supone que se hallarán en peores circunstancias, aunque se esté en una estancia exterior. Debido a esta característica, la temperatura radiante puede aprovecharse como un principio para planificar sistemas de calefacción o refrigeración durante el reacondicionamiento.

Cuando la radiación de calor, generada por un elemento puntual o por varias superficies de la vivienda, supera significativamente la temperatura ambiente, se incrementa la incomodidad y disminuye la capacidad de trabajo de los ocupantes en verano. Si la suma de las temperaturas de las superficies en un espacio es mayor que la temperatura corporal de una persona, esta sentirá calor; por el contrario, si es más baja, sentirá frío, ya que el calor corporal será irradiado hacia las superficies circundantes. En climas fríos, esta es una de las formas más cómodas de transmitir calor, ya que no se trata de calentar el aire, sino de irradiar energía infrarroja, similar a cómo percibimos la radiación solar.[16]

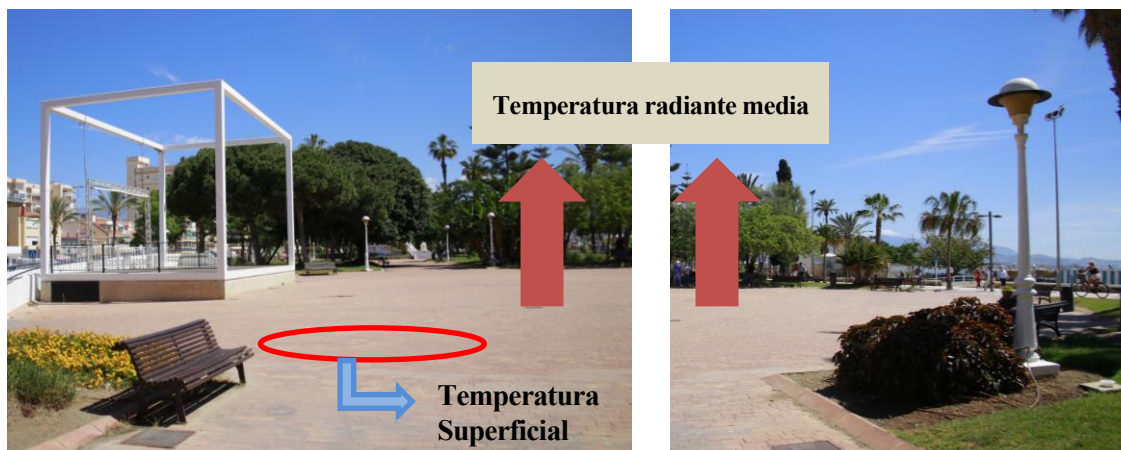


Ilustración 7: Ejemplo de Temperatura radiante media y superficial en el caso 2.

1.3.2 Carga Térmica (Q)

Este índice de confort se define como la cantidad de calor que es necesario extraer o suministrar al cuerpo para alcanzar una sensación de confort. Para una persona que se encuentra hipotéticamente en estado de confort, es necesario tener una temperatura de la piel y un nivel de sudoración dentro de parámetros aceptables.

Este indicador refleja condiciones de confort cuando su valor es inferior a 50 W/m^2 . Esto solo se da en situaciones de baja actividad física correspondientes a una actividad sedentaria, como estar quieto o sentado, para cualquier nivel de vestimenta siempre y cuando la temperatura exterior sea inferior a $33 \text{ }^\circ\text{C}$. Una vez superada esa temperatura, se pasa a condiciones cálidas. En caso de realizar actividades que impliquen mayor movimiento, es decir, actividades más intensas, como ejercicio físico, los valores de carga térmica superan los 50 W/m^2 . Incluso con una temperatura máxima de $40 \text{ }^\circ\text{C}$, se alcanzarían condiciones sofocantes, superando los 160 W/m^2 . [17]

ACTIVIDAD	W/m2	Mt
Reposo, persona acostada	46	0,8
Reposo, persona sentada	58	1,0
Reposo, persona de pie	70	1,2
Actividad ligera, persona sentada. (oficina, domicilio, escuela, laboratorio)	70	1,2
Actividad ligera, persona de pie (compras, laboratorio, industria ligera)	93	1,6
Actividad media, persona de pie (vendedor, limpieza, uso de máquinas)	116	2,0
Actividad sostenida (usos de máquinas pesadas, talleres, etc.)	174	3,0

Tabla 1: Valores de carga térmica para distintos tipos de actividad.

1.3.3 PET

El PET se define como la temperatura fisiológica equivalente en un lugar determinado, tanto exterior como interior. Corresponde a la temperatura del aire en la que, dentro de un entorno típico interior, se conserva el equilibrio térmico del cuerpo humano (considerando un metabolismo de 80 W por actividad ligera, además del metabolismo basal, y una resistencia térmica de la ropa), manteniendo las temperaturas centrales y de la piel equivalentes a las registradas en las condiciones analizadas. [18]

Su definición, independiente de la actividad y la vestimenta, convierte al PET en un auténtico índice climático. A diferencia de la mayoría de los otros índices bio-meteorológicos (como el índice de sensación térmica, la temperatura aparente o el índice de estrés por calor), el PET considera de manera termo-fisiológicamente precisa la influencia de todos los parámetros climáticos que afectan la temperatura, como la temperatura del aire, la temperatura radiante, la velocidad del aire y la humedad, evaluando su impacto real sobre los procesos reguladores y el estado térmico del cuerpo. No obstante, esto implica que el PET no puede ser una medida absoluta del confort o del estrés térmico. Por ejemplo, una persona podría sentir frío con un PET de 20°C si solo lleva puesto un traje de baño, pero sudaría si usa un abrigo. Si la persona realizara una actividad física intensa, percibiría ese mismo valor de PET como "demasiado cálido", mientras que en reposo lo consideraría "demasiado frío". Por lo tanto, el PET debe interpretarse como una base para evaluar el entorno térmico, que debe ajustarse a las características individuales en cuanto a vestimenta y actividad. A pesar de ello, el PET resulta mucho más versátil y útil que los índices térmicos tradicionales para este tipo de evaluaciones.[19]

PET	Sensación térmica	Nivel de estrés térmico	Intervalos para los mapas
< 4	Muy frío	Extremo	Sensación de frío muy frío
4-8	Frío	Fuerte, intenso	
8-13	Fresco	Moderado	Sensación de frío moderado
13-18	Ligeramente frío	Ligero	Sensación aceptable
18-23	Confortable	Nulo	
23-29	Ligeramente cálido	Ligero	
29-35	Cálido	Moderado	Sensación de calor
35-41	Caluroso	Fuerte, intenso	
>41	Muy cálido	Extremo	

Tabla 2: Valores del PET para distintos escenarios. [18]

1.4 Estrategias actuales para afrontar las problemáticas descritas

El clima urbano severo es causado principalmente por factores urbanos y, en menor medida, por las condiciones meteorológicas [20]. En este contexto, diversos estudios han investigado de manera exhaustiva las medidas para mitigar el efecto de isla de calor urbana y sus beneficios energéticos, ambientales y económicos.

Las medidas para mitigar el clima urbano se centran en tres principales líneas de acción:

- Reducción de las temperaturas superficiales mediante el uso de materiales adecuados tanto para el entorno urbano como para las edificaciones.
- Aumento de las zonas verdes dentro del entorno urbano.
- Planificación urbana que priorice la mitigación del clima como un objetivo clave.

1.4.1 Reducción del Albedo en pavimentos urbanos

Las zonas urbanas se caracterizan por tener albedos bajos debido a la presencia de edificios oscuros y superficies que absorben la radiación solar. En ciudades europeas, los albedos suelen estar entre 0.15 y 0.30 [21], demostraron el impacto de diferentes pavimentos comúnmente utilizados en áreas urbanas, encontrando que el asfalto incrementa notablemente la temperatura superficial y almacena más calor en comparación con pavimentos de hormigón. En un estudio se señaló que pintar los pavimentos de blanco, con albedos cercanos a 0.55, iguala la temperatura superficial del pavimento a la temperatura ambiente urbana, mientras que no pintarlos reduce el albedo a 0.15, lo que puede generar una diferencia de temperaturas de hasta 11°C [22]. También se realizó un experimento en el que midieron el albedo en distintas superficies y encontraron una diferencia de 4 a 8°C en la temperatura superficial entre un material blanco con albedo de 0.72 y uno negro con albedo de 0.08.[23]

1.4.2 Materiales reflectores para el pavimento

Un aumento en el albedo superficial de los edificios impacta directamente en su balance energético. Numerosos estudios han demostrado los beneficios de utilizar cubiertas reflectantes para reducir el efecto de isla de calor urbana. En todos los casos estudiados, el uso de pinturas con alto albedo reduce significativamente la temperatura de las cubiertas. Se encontró que las cubiertas blancas (albedo = 0.75) son más frescas que las grises (albedo = 0.30). Sin embargo, advirtieron que aumentar el albedo puede no ser eficaz en la reducción de la temperatura si la emisividad del material reflectante es baja.[24]

Los recubrimientos de cubiertas para mitigar el efecto de la isla de calor urbana pueden ser blancos o metálicos (normalmente de aluminio). Las cubiertas blancas deben incluir una capa de materiales poliméricos, como el acrílico o el óxido de zinc, para actuar como superficies reflectivas. Las cubiertas metálicas consisten en una fina capa de asfalto recubierta con una película de aluminio para proteger el asfalto de la radiación ultravioleta. Aunque este tipo de recubrimiento presenta un incremento significativo en la reflectividad, su emisividad infrarroja es baja [25]

La mayoría de las cubiertas metálicas, de acero o aluminio, se caracterizan por tener altas reflectividades (0.6-0.7) y bajos valores de emisividad (0.25). En contraste, las propiedades ópticas del hormigón y las tejas muestran una baja reflectividad (0.15-0.3) y una alta emisividad (0.9).

En la Tabla [3] se presenta los valores típicos para distintas clases de cubiertas comunes.

Material de paredes	Reflectancia	Absortancia
	%	%
Ladrillo rojo	12	88
Madera lisa	22	80
Concreto	35	65
Hoja de aluminio pulido reflectora	88	12
Pintura negra	5	95
Pintura gris oscura	9	91
Pintura marrón media	16	84
Pintura blanca semi-brillante	43	57
Pintura blanca brillante	75	25

Tabla 3: Datos de reflectancia y absortancia para diferentes materiales y pinturas de paredes

1.4.3 Zonas verdes en el entorno urbano y en la edificación

Las zonas verdes ofrecen beneficios ecológicos y psicológicos a la sociedad, y contribuyen significativamente a la mitigación del efecto de isla de calor. En el balance energético de estas áreas, las hojas de árboles y plantas interactúan con el medio ambiente a través de un intercambio de energía, regido principalmente por la radiación solar y la radiación reflejada (albedo), el calor sensible y el calor latente (evaporación). Además, las zonas verdes interactúan con el entorno mediante un intercambio de masa a través de la evapotranspiración y la fotosíntesis (La evapotranspiración se refiere a la pérdida de agua de las plantas hacia la atmósfera debido a la evaporación y transpiración). La transpiración es el proceso en el que el agua de las plantas se transfiere a la atmósfera como vapor. La transferencia de calor latente de las plantas hacia la atmósfera es de aproximadamente 2324 kJ por kilogramo de agua evaporada y se estima que cada árbol puede evaporar 1460 kg de agua en un día típico de verano [26].

Un estudio determinó que la variable más significativa en la mitigación del efecto de isla de calor es la vegetación, concluyendo que los parques crean un "efecto oasis" capaz de reducir la temperatura entre 1°C y 5°C durante la noche [27]. Simulaciones realizadas por [23] encontraron diferencias de 2°C a 8°C respecto al entorno urbano, encontraron una diferencia de 8°C entre parques con alta vegetación y las zonas urbanas periféricas de San Francisco.



Ilustración 8: Ejemplo de inclusión de espacios verdes en áreas urbanas

1.4.4 Sombra en edificios

El uso adecuado de vegetación en los alrededores de los edificios puede tener un impacto significativo en la temperatura urbana. Se ha comparado el comportamiento térmico de un edificio rodeado de césped y vegetación con otro rodeado de grava sin vegetación. Sus resultados mostraron que la temperatura superficial del césped al mediodía es hasta 15°C inferior a la de la grava [28]. Concluyeron que los edificios rodeados de grava sin vegetación consumen entre un 20% y un 30% más de energía en refrigeración que aquellos rodeados de césped y vegetación. Los árboles, además de mitigar el efecto de isla de calor, también contribuyen al ahorro energético de los edificios. [29]



Ilustración 9: Morera en el Instituto Liceo Caracense (foto Catálogo de árboles singulares.- Asociación Micorriza)

1.4.5 Cubiertas verdes

Las cubiertas verdes consisten en el tratamiento técnico de techos mediante la incorporación de capas de vegetación adaptadas a las condiciones físicas y climáticas del lugar. Esta técnica se ha vuelto popular debido a sus múltiples beneficios ambientales, como la recolección y uso del agua de lluvia, la mejora de la calidad del aire y la reducción de la temperatura del aire. Además, proporcionan beneficios estéticos y permiten la creación de huertos ecológicos. Las cubiertas verdes no solo reducen la carga térmica de los edificios, sino que también contribuyen a mitigar el efecto de isla de calor en las urbanizaciones. Se realizó un estudio el cual determinó que, en edificios con cubiertas verdes, la temperatura de las plantas es entre 4 y 5°C menor que la temperatura ambiente [30]. En el año 2005, un estudio estableció que en edificios con cubiertas verdes es posible mantener una temperatura de confort sin necesidad de aire acondicionado [31].



Ilustración 10: Ejemplo de cubierta vegetal en edificio.

1.4.6 Reducción del calor antropogénico

El efecto de isla de calor urbana está relacionado con la transformación del medio natural por el entorno urbano y las actividades humanas, como la construcción, el transporte y la industria. Según [32], el calor antropogénico es una imperfección en el sistema energético del metabolismo urbano. Aunque es difícil estimar el intercambio de calor de fuentes antropogénicas debido a la variabilidad en tiempo, ubicación y cantidad, siempre es posible mitigar estas fuentes de calor. Un estudio demostró que apagar los sistemas de aire acondicionado en edificios puede reducir la temperatura urbana entre 1°C y 2°C [33].

Existen varias medidas encaminadas a reducir el calentamiento antropogénico que maximiza el efecto del calor natural extremo. Prohibir determinadas actividades industriales en zonas urbanas densamente pobladas, promover el uso eficiente de sistemas de aire acondicionado y desincentivar las salidas de aire de estos directamente por las fachadas o balcones son algunas de las medidas propuestas junto con planes de transporte que faciliten la transición a vehículos más sostenibles como los eléctricos y fomenten el uso del transporte público. [34]

1.4.7 Alta densidad urbana

La densidad espacial de las ciudades, determinada por las proporciones geométricas de sus calles y edificios, influye en las características térmicas urbanas. Generalmente, una alta compacidad está asociada con una alta densidad urbana, esto responde a la necesidad de agrandar las ciudades a lo largo de los siglos por la gran afluencia de personas buscando oportunidades laborales fuera de los entornos rurales. La concentración de edificios reduce la penetración solar y dificulta el escape de radiación de onda larga, ya que la radiación incidente en los edificios se libera posteriormente en forma de calor. Se simuló el comportamiento térmico tridimensional de una urbanización y encontraron que los edificios amplios y bajos liberan energía de manera más eficiente que los edificios más altos y con menor superficie. [35]

Los ayuntamientos tienen fundamentalmente dos herramientas para reducir este efecto: el planeamiento urbano y el código de construcción o edificación. Un código de construcción restrictivo podría eliminar el uso de tejados oscuros u obligar a la incorporación de “tejados fríos” (tejados con cubiertas verdes). El planeamiento urbano puede incorporar el uso de “suelos fríos” con el uso de materiales con propiedades altamente refractivas y un diseño urbano que evite que el calor quede atrapado en la ciudad. La compensación de nuevas áreas de desarrollo urbano con zonas verdes es otra medida ampliamente aceptada.

1.4.8 Incorporación de elementos de agua

Una mala planificación de la geometría urbana puede tener un efecto crucial a la hora de frenar o bloquear vientos locales o brisas, precisamente estos son los que ayudan al enfriamiento convectivo, por lo que diseñar corredores verdes o promoviendo zonas de construcción restringida pueden ser medidas efectivas. Favorecer la incorporación de infraestructura azul (opciones de enfriamiento por evaporación) en el tejido urbano tales como ríos, zonas húmedas y otros grandes cuerpos de agua puede ayudar a reducir la temperatura urbana. [34]

1.5 Objetivos

El objetivo principal de este trabajo es hacer un estudio de los casos para poder hacer propuestas que ayuden a mitigar los efectos del calor sobre las personas, motivo del escaso uso de las instalaciones exteriores en temporadas cálidas, favorecer el confort térmico de las personas en dichas instalaciones y aumentar así su ocupación, haciendo también que se reduzca el gasto energético del hogar y la ciudad al incrementar el tiempo fuera de la vivienda ya que se dispone de una zona habilitada donde las personas sienten bienestar térmico.

Se hará una valoración de las condiciones ambientales para tener un modelo base sobre el que añadir las mejoras para después comprobar la eficacia de las medidas propuestas. El trabajo se centrará, por tanto, en la rehabilitación energética y ambiental de espacios exteriores mediante la utilización de técnicas pasivas de acondicionamiento ambiental. Para ello se analizarán tres estancias representativas.

2 METODOLOGÍA

La medida del carácter de un hombre está en lo que haría si supiera que nunca sería descubierto.

-Thomas B. Macaulay-

La metodología usada para hacer este trabajo se basa en el procedimiento representado en la Figura 1. Es fundamental seguir una serie de pasos detallados que permitan obtener datos precisos para una correcta evaluación de los casos de estudio, de manera ordenada y fundamentada en documentación contextualizada, contrastada y verificada.

Todo procedimiento comienza con un "Paso 0", en este caso se corresponde al análisis inicial de las estancias para saber identificar los problemas a investigar, es importante estudiar los casos para que tengan cierto interés académico. Es necesario que los problemas a analizar se caractericen por tratar sobre un tema actual, relevante y sin resolver, que necesita ser abordado para satisfacer necesidades básicas, como en este caso el bienestar térmico en zonas exteriores con un clima cálido.

Como se mencionó previamente, la problemática identificada radica en la existencia de tres espacios urbanos y públicos, expuestos a condiciones exteriores severas en temporadas veraniegas, sobre los cuales se busca intervenir para modificar los parámetros hasta alcanzar niveles de confort viables. Uno de los casos es un espacio donde la estancia de las personas es prolongada y es ocupado sobre todo por infantes, las medidas de intervención serán menos completas que en zonas con estancias largas, pero lo suficientes como para reducir drásticamente el discomfort existente. Dichas medidas incluirán la incorporación de elementos de control solar, la remodelación del pavimento por materiales con un alto albedo y se añadirán elementos naturales que absorben calor.

Una vez identificada la problemática, es esencial llevar a cabo una revisión exhaustiva de la literatura para adquirir un conocimiento sólido sobre el tema y sentar las bases para su estudio y análisis. Con una base teórica consolidada, se procede a la identificación de elementos básicos en un modelo de confort para áreas exteriores. A continuación, se hace un modelo base detallado para cada caso, estos modelos suelen ser matemáticos, lo que los hace más rigurosos desde un punto de vista científico; no obstante, en espacios urbanos, como es el caso, pueden perder algo de precisión debido a la influencia de múltiples factores.

El siguiente paso de la metodología, implica la realización de análisis de sensibilidad, con el objetivo de estudiar el impacto de ciertos parámetros y tener propuestas para mejorar los casos iniciales. Dichas hipótesis se simularán en los programas que se mencionan a continuación, para observar como de eficientes han resultado. Además, se evaluará la exactitud y fiabilidad del modelo a través de los indicadores de confort que se han definido previamente.

La comparación de los resultados con el estado inicial es una fase crítica en este proyecto. Este proceso implica evaluar el impacto real de las medidas implementadas en comparación con las condiciones energéticas y de confort que existían antes de la intervención.

Para realizar las distintas partes de este estudio he utilizado los programas mencionados a continuación.

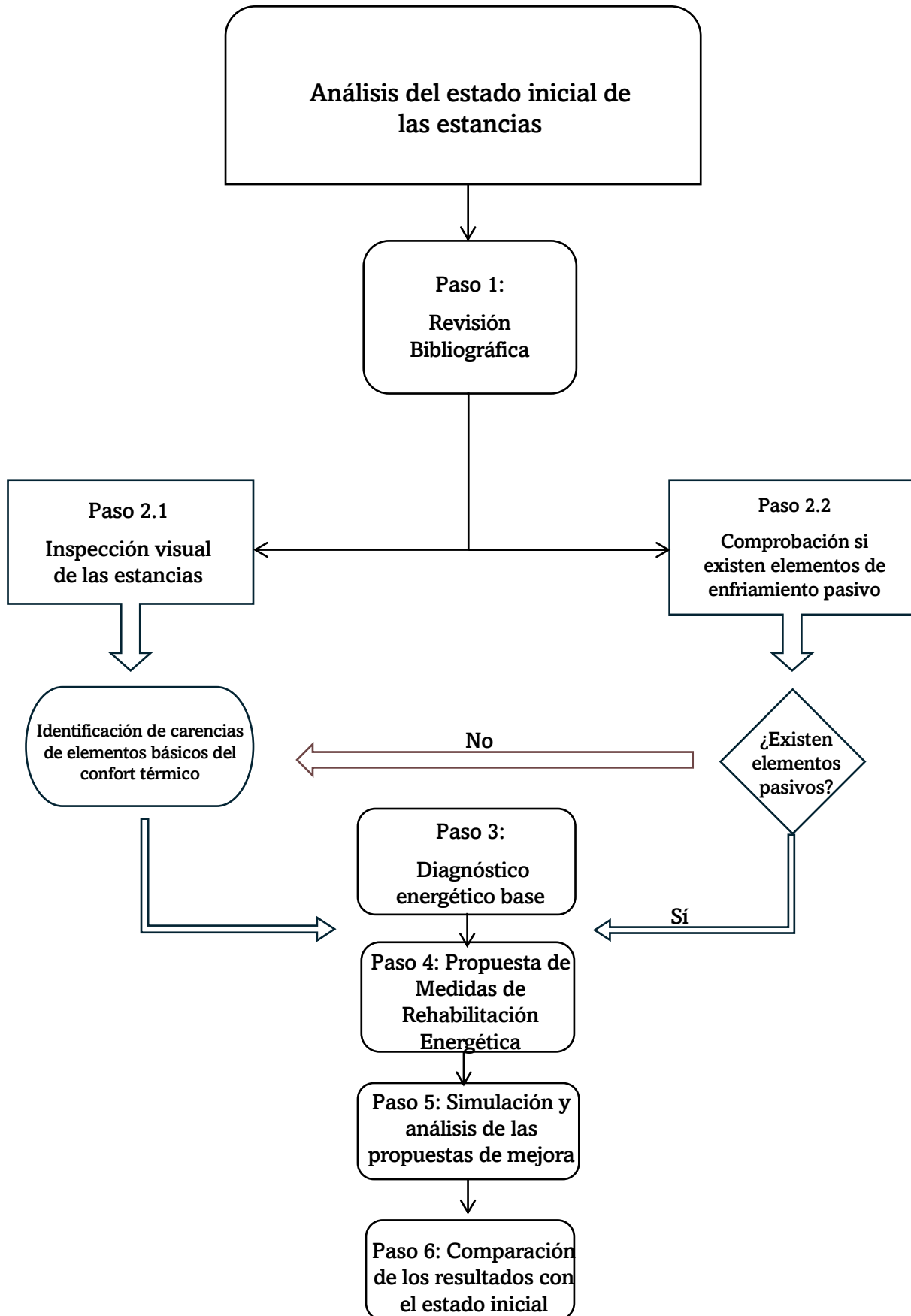
Para analizar el clima, el confort térmico, la temperatura superficial y los demás indicadores de bienestar térmico se ha usado el programa “*Cartuja Canat*”, hecho por los profesores del departamento de Termotecnia de la Universidad de Sevilla, creando un modelo geométrico con un número determinado de celdas, este detalla los datos térmicos y de confort de cada celda en un intervalo de tiempo, ya sea de diez minutos o de hora en hora.

IFC Builder es una herramienta de modelado BIM que ha sido diseñada por CYPE para facilitar la creación de modelos arquitectónicos tridimensionales precisos. Desde su lanzamiento, IFC Builder ha evolucionado para integrarse completamente con otros programas del ecosistema CYPE, permitiendo la exportación e importación de modelos en formato IFC, un estándar abierto en la industria de la construcción. Esta interoperabilidad ha sido clave para su adopción en proyectos que requieren una coordinación efectiva entre diferentes disciplinas.

Se ha optado por la combinación de IFC Builder y CYPETHERM debido a su capacidad para abordar el modelado arquitectónico, sobre todo a la hora de hacer una geometría del suelo y hacer un gráfico de los materiales.

A la página siguiente, se muestra el diagrama que se ha usado en esta metodología:

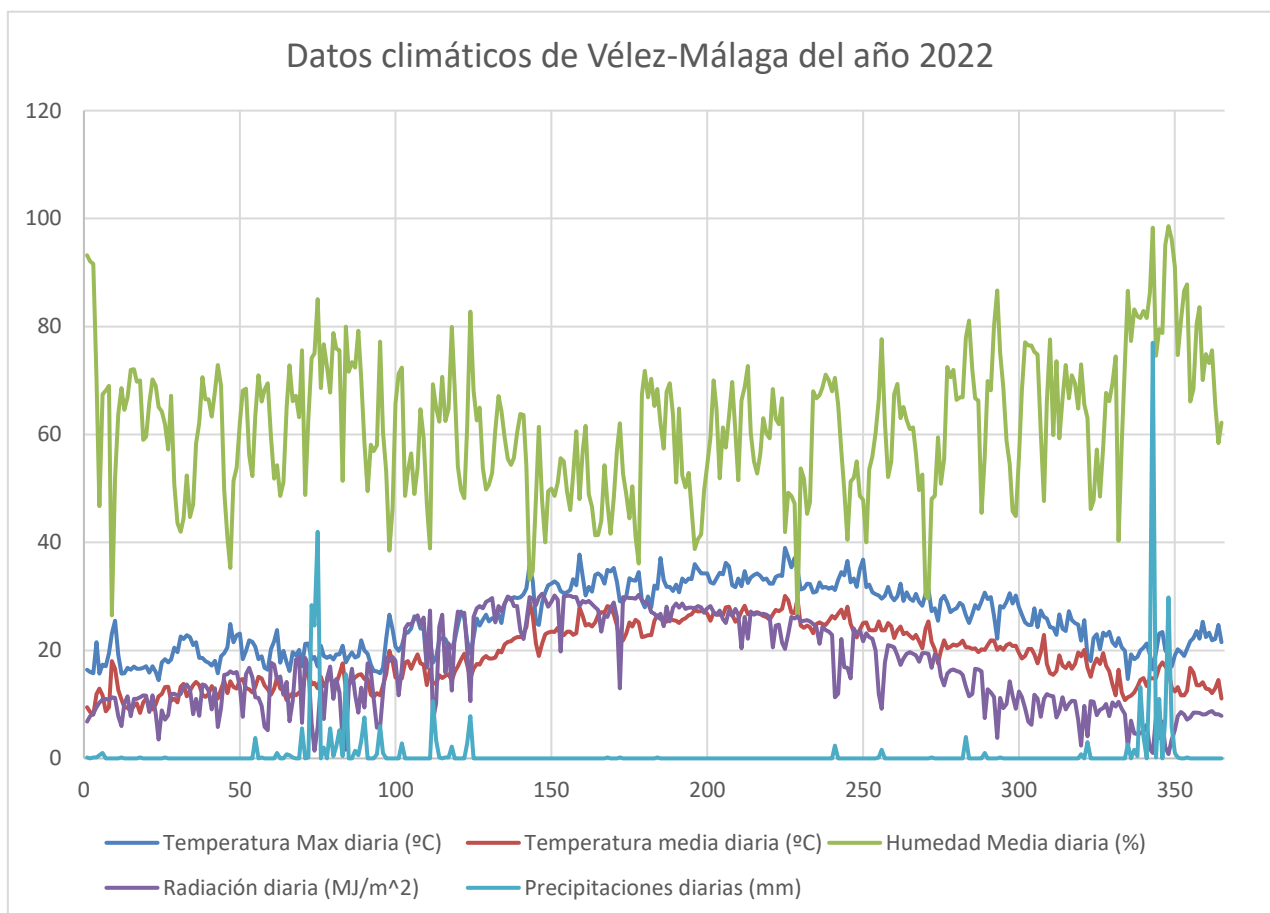
Figura 1: Metodología seguida en el desarrollo



2.1 Clima del estudio

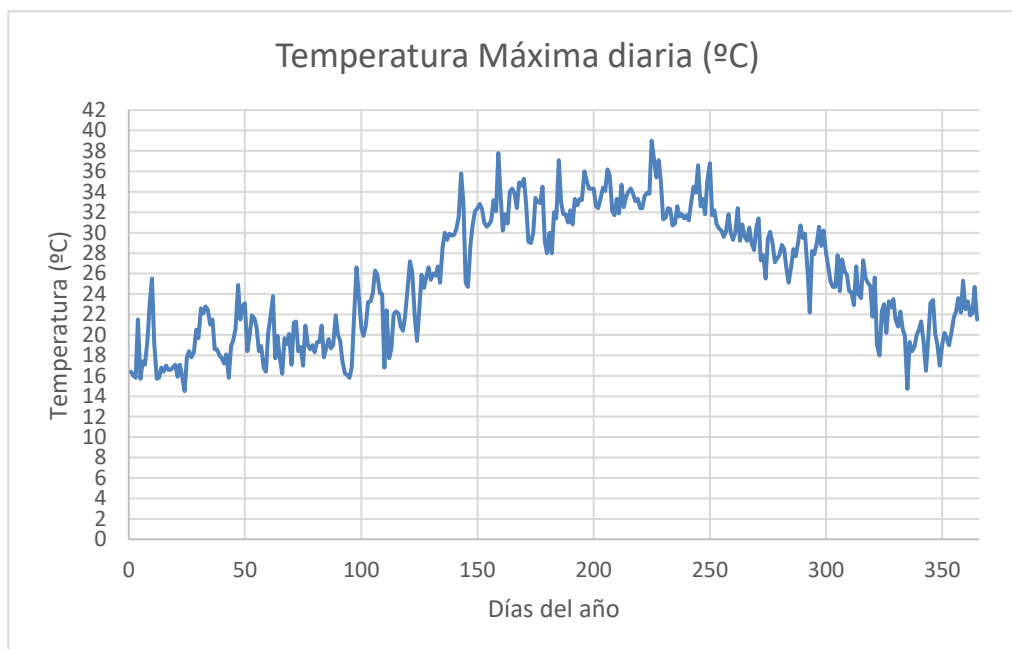
En la siguiente gráfica se observan los datos climáticos de Vélez-Málaga, se han escogido los datos del año 2022 al considerarse reciente y tener medias acordes a la del año típico. La gráfica refleja de manera clara las características del clima mediterráneo en Vélez-Málaga. Durante el año 2022, los veranos se caracterizaron por ser cálidos y secos, con temperaturas máximas que alcanzaron los 35°C, bajas precipitaciones y una radiación solar elevada. Al contrario, los meses de invierno y primavera fueron más frescos y húmedos, con temperaturas más moderadas, altos niveles de humedad y precipitaciones irregulares pero significativas para la zona en la que se desarrollará el estudio. La radiación solar y la humedad relativa siguen patrones inversos: en verano, la radiación es alta y la humedad baja, mientras que en invierno, la radiación disminuye y la humedad aumenta. Las precipitaciones son más abundantes en los meses de transición, contribuyendo a los picos de humedad observados.

Estos datos proporcionan una perspectiva valiosa para el análisis del confort térmico, la planificación energética y la gestión de recursos hídricos en la región.



Gráfica 2: Representación gráfica de los datos climáticos obtenidos del Instituto de Investigación y Formación Agraria y Pesquera (IFAPA).

Representada por una línea azul, la temperatura máxima diaria experimenta una variación estacional marcada. En los meses invernales (comienzos y finales del año), las temperaturas máximas suelen oscilar entre 10 y 20°C, mientras que, durante los meses de verano, los valores alcanzan su punto más alto, superando los 35°C en algunos días. Este comportamiento refleja los patrones normales de calentamiento y enfriamiento del ciclo anual, con un incremento gradual de las temperaturas conforme se acerca el verano, y un descenso progresivo en el otoño e invierno.



Gráfica 3: Apreciación detallada a de los datos de Temperatura máxima en el año 2022

2.1.1 Situación Geográfica

Las zonas de estudio se encuentran situadas en Torre del Mar, localidad costera de la provincia de Málaga.



2.2 Estudio de los casos

2.2.1 Caso 1

La Ilustración [11] muestra parte del área costera de Torre del Mar, Vélez-Málaga, donde destaca el parque infantil, el primer caso de estudio. Este espacio público tiene gran afluencia de personas, especialmente niños, debido a su uso recreativo. La zona se encuentra expuesta a las condiciones ambientales típicas de un clima costero mediterráneo, caracterizado por temperaturas altas, alta radiación solar, y vientos húmedos de baja intensidad provenientes del mar. Estos factores afectan a la experiencia de los usuarios a la hora de hacer uso y disfrute de la estancia, recalcando que las temperaturas que pueden llegar a alcanzar el suelo son peligrosas, teniendo en cuenta que quienes suelen ocupar esta área son infantes.

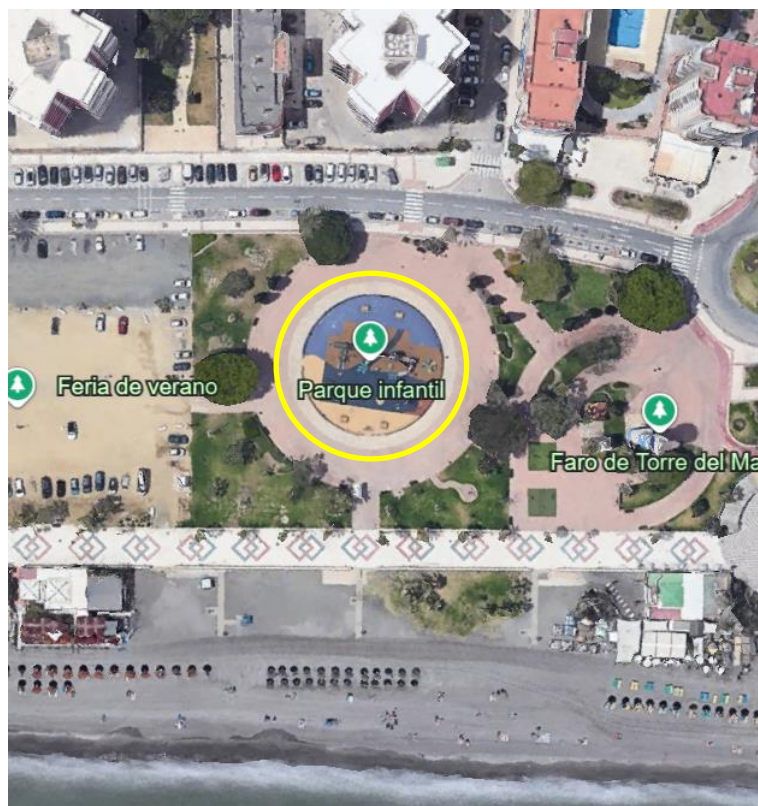


Ilustración 12: Fotografía aérea de Google maps del caso de estudio 1, parque de niños

2.2.1.1 Caso Base

Se comenzó el análisis con la situación inicial del emplazamiento, los problemas a tratar son parecidos entre un caso y otro puesto que los tres padecen los siguientes factores:

- Falta de sombra, por lo cual las personas reciben radiación directa. En estaciones calurosas supone un problema que teniendo en cuenta el clima podría llegar a afectar gravemente a la salud.
- Suelos que absorben la mayor parte de radiación y reflejan un pequeño porcentaje de esta (albedo bajo). Esto lleva a que el suelo almacene calor y al pasar por encima o hacer uso de ellos las personas sentirán disconformidad debido al calor que se trasmite.
- Falta de sistemas de refrigeración pasivos. En este caso el parque está rodeado de hormigón con un factor de absorción de $\alpha=0,7$ aproximadamente, pero el suelo del parque tiene un $\alpha=0.9$.

El análisis precedente muestra que, al tener un suelo muy oscuro, el factor de absorción asciende hasta un $\alpha=0,9$, lo que hace que la temperatura superficial pueda llegar a alcanzar 50°C en meses como agosto. Teniendo en cuenta que el suelo es de caucho sabemos que el calor que absorbe difícilmente es transmitido hacia la tierra debido a su baja conductividad térmica, en otras palabras, gran parte del calor que absorbe, que no es poco, es re-radiado hacia las personas que están encima, creando así gran discomfort. Si vamos más allá, podríamos afirmar que en estas circunstancias nadie querría estar esa estancia ya que podría causar problemas de salud debido a las altas temperaturas del suelo, del ambiente y de la total falta de sombra.



Ilustración 13: Vista de planta del suelo actual del parque de niños.

Usando el programa “Cartuja Canat” junto con los datos climáticos integrados de los meses de verano de la localidad, se ha hecho una mallado del área de estudio, el programa permite poner cuadrículas que se numeran de izquierda a derecha y de arriba hacia abajo, cada celda mide 3 m2 en la realidad, obteniendo datos para cada celda. Para hacer una comparación detallada, se ha escogido la hora más desfavorable que son las cuatro de la tarde y se han obtenido los siguientes resultados, haciendo especial énfasis en las temperaturas superficiales, el PET. Datos como la temperatura del aire, la carga térmica y la radiación absorbida, se comentarán, pero los resultados se incluirán en los anexos. En la siguiente ilustración se pueden observar los resultados del análisis inicial del caso base 1.

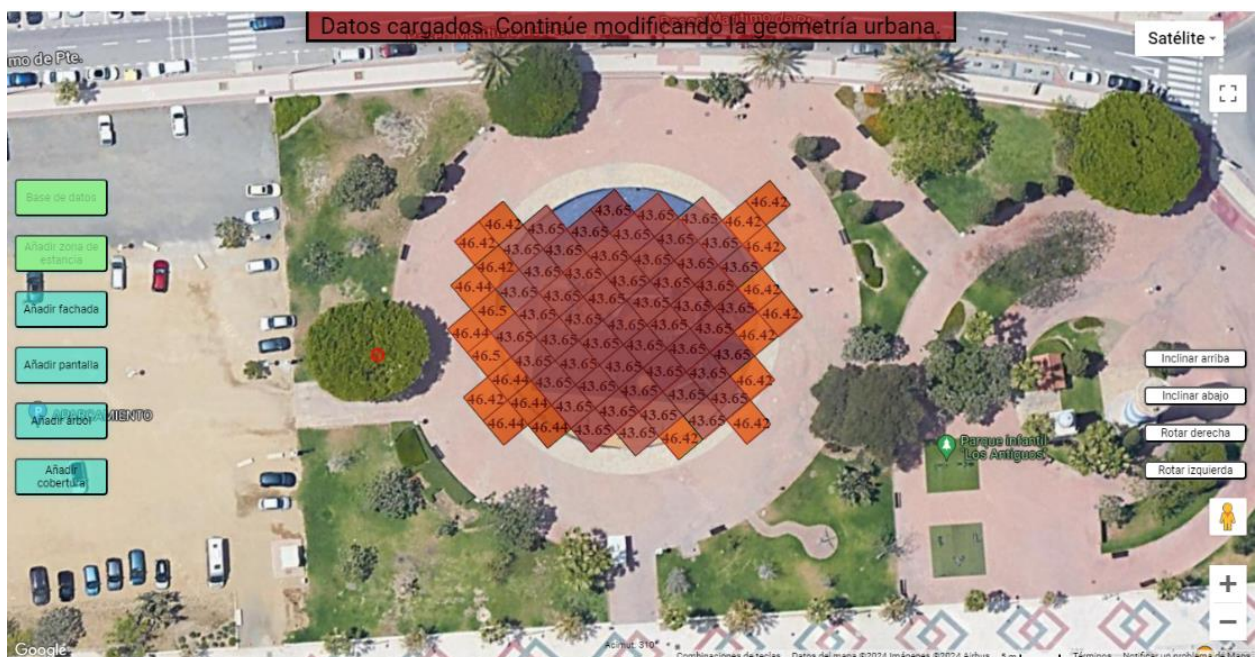


Ilustración 14: Resultado de temperaturas superficiales del mallado del estudio inicial.

Como podemos observar los resultados de la temperatura superficial son bastante desfavorables, llegando a alcanzar los 43,66 °C. Estos datos reflejan que mayormente este espacio estaría desocupado en los meses de verano, aunque se haya escogido la peor hora para hacer el análisis, la falta de sombra y la consecuente exposición a la radiación directa hace que quien ocupe esta estancia se sienta en disconfort prácticamente desde que sale el sol hasta que se pone.

En la ilustración [16] se muestran los datos obtenidos de los resultados del análisis del factor PET, como se puede observar estos resultados son cercanos de sentir calor extremo según los intervalos para este factor que se han explicado anteriormente

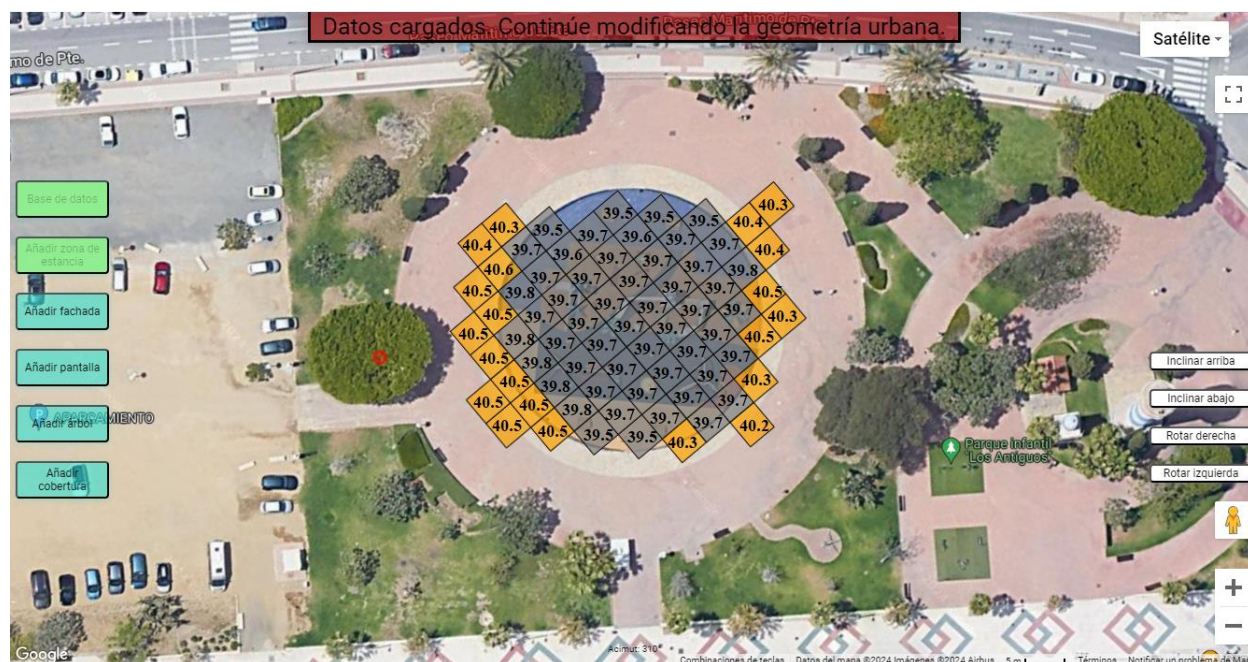


Ilustración 15: Resultados del índice PET

Un valor medio de PET de 40 °C en una estancia al aire libre es motivo de preocupación porque indica un entorno térmico extremadamente caluroso que puede afectar seriamente al confort y a la salud de las personas presentes. Estos resultados denotan ambientes cercanos a la incomodidad, las personas sentirán agotamiento, deshidratación y dificultad para concentrarse, lo que puede disminuir la productividad y el disfrute de la estancia al aire libre. El calor extremo puede generar irritabilidad, agotamiento y otros síntomas de fatiga térmica, lo que limita las actividades recreativas o sociales en el espacio.

Un valor de PET tan alto desincentiva el uso de esos espacios. Los usuarios tenderán a evitarlos, especialmente en las horas más calurosas del día, lo que reduce la funcionalidad del espacio al aire libre.

Estos resultados incluso podrían suponer un riesgo a la salud ya que personas mayores y niños están especialmente en riesgo en entornos con un PET de 40 °C. Estas personas pueden no tener la capacidad de adaptarse al calor extremo tan fácilmente, lo que aumenta el riesgo de complicaciones de salud, como deshidratación severa, síncope (desmayos) o insuficiencia cardíaca.

2.2.1.2 Propuestas de mejora

Visto el análisis inicial, para remediar la baja reflectancia del suelo, en este caso se ha pensado el cambio del pavimento del parque por uno con mayor albedo. Se le pondrá un suelo permeable blanco que recoja el agua de lluvia y la almacene para usarla en fuentes o para futuras aplicaciones en otras estancias pues en esta no será posible usarlos por la afluencia de niños ya que no se quiere poner en riesgo su salud.

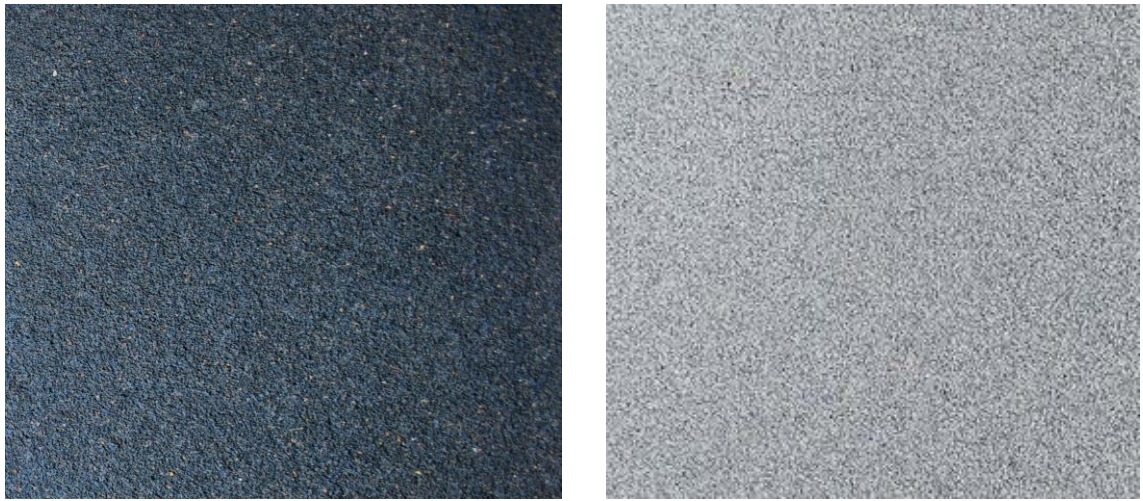
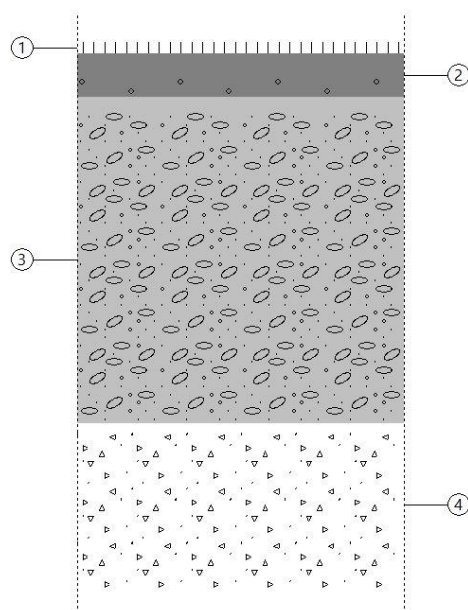


Ilustración 16: Comparación del suelo del caso 1, a la izquierda el antiguo y a la derecha el nuevo



Capas
1 - Etileno propileno dieno monómero [EPDM]: 2 cm
2 - Hormigón en masa 2300 < d < 2600: 8 cm
3 - Tierra cruda con densidad 800 kg/m3: 60 cm
4 - Arena y grava [1700 < d < 2200]: 30 cm
Espesor total: 100.0 cm
Caracterización térmica
Resistencia térmica: 2.27 m ² ·K/W

Ilustración 17: Composición de materiales en el nuevo pavimento del caso 1.

Para el suelo de alrededor también se ha sustituido el pavimento por uno de color blanco, como se puede observar en la siguiente ilustración:



Ilustración 18: A la izquierda, el antiguo pavimento con un $\alpha=0.7$, a la derecha el nuevo con un $\alpha=0.3$

Para frenar la radiación directa se ha optado por poner elementos de sombra como toldos, en la ilustración a continuación se puede ver la elección escogida:



Este modelo de toldo es impermeable y tiene unas dimensiones de 7x5x5 metros, para este caso necesitaríamos 53 de estos toldos.

Ilustración 19: Toldos a utilizar para el proyecto

Como se ha mencionado antes, la vegetación ayuda a atrapar el calor y reduce el mismo en unos grados significativos al proporcionar también sombra al ambiente, al hacer el análisis inicial no se disponía de todos los datos de los tipos de árboles de la zona así que se han podido evaluar pinos, para los demás arboles se han supuesto arces pues tienen un diámetro parecido al de los árboles de la zona. Para ayudar a bajar la temperatura en la estancia se han colocado arboles extra alrededor del parque.

2.2.2 Caso 2

El caso 2 es una plaza de conciertos, generalmente se hace uso de esta por la noche ya que como se ha visto no existen unas condiciones ambientales favorables para su uso en las horas de sol. El color del pavimento es el mismo que en el caso 1, rojo ladrillo, tiene un factor de $\alpha=0.7$ lo que implica que absorbe una cantidad significativa de radiación solar, contribuyendo al calentamiento del suelo y generando malestar térmico para las personas que la transitan o la usan. El pavimento, al estar expuesto al sol sin ningún elemento de sombra, retiene el calor, lo que aumenta la temperatura superficial y afecta la sensación térmica en el área. Además, podemos apreciar que ni los bancos cercanos tienen protección alguna contra el sol.

La combinación de la ausencia de sombras y el pavimento que absorbe y emite calor hace que el espacio sea pésimo en términos de confort térmico, especialmente en el clima cálido y soleado que tiene.

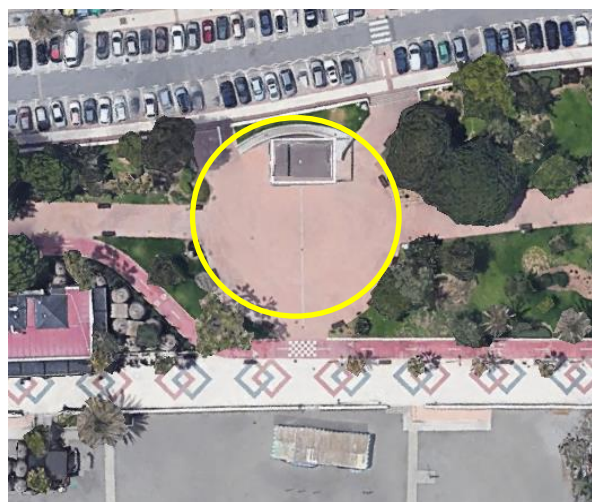


Ilustración 20: Ala izquierda, fotografía aérea de Google maps del caso de estudio 2, a la derecha vista real de la plaza de conciertos.

Se comenzó el análisis con la situación inicial del emplazamiento, los problemas a tratar son casi iguales entre los casos 1 y 2, puesto que ambos padecen los siguientes factores:

- Falta de sombra, por lo cual las personas reciben radiación directa. En estaciones calurosas supone un problema que teniendo en cuenta el clima podría llegar a afectar gravemente a la salud.
- Suelos que absorben la mayor parte de radiación y reflejan un pequeño porcentaje de esta (albedo bajo). Esto lleva a que el suelo almacene calor y al pasar por encima o hacer uso de ellos las personas sientan discomfort debido a la radiación térmica que se transmite.

Los problemas justo antes descritos originan que la temperatura superficial pueda llegar a alcanzar 50°C en meses como agosto. Teniendo en cuenta que el suelo es de hormigón, podríamos afirmar que en estas circunstancias, como en el caso anterior, nadie querría estar esa estancia ya que de nuevo, podría causar problemas de salud debido a las altas temperaturas del suelo, del ambiente y de la total falta de sombra.

Usando el programa “Cartuja Canat” junto con los datos climáticos integrados de los meses de verano de la localidad, se ha hecho una mallado de la estancia, el programa permite poner cuadrículas que se numeran de izquierda a derecha y de arriba hacia abajo, cada celda mide 3m² en la realidad, obteniendo datos para cada celda. Para hacer una comparación detallada, se ha escogido la hora más desfavorable que son las cuatro de la tarde y se han obtenido los siguientes resultados, enfatizando en las temperaturas superficiales y el PET. Datos como la temperatura del aire, la carga térmica y la radiación absorbida, se comentarán, pero los resultados se incluirán en los anexos. En la siguiente Ilustración [21] se pueden observar los resultados del análisis:

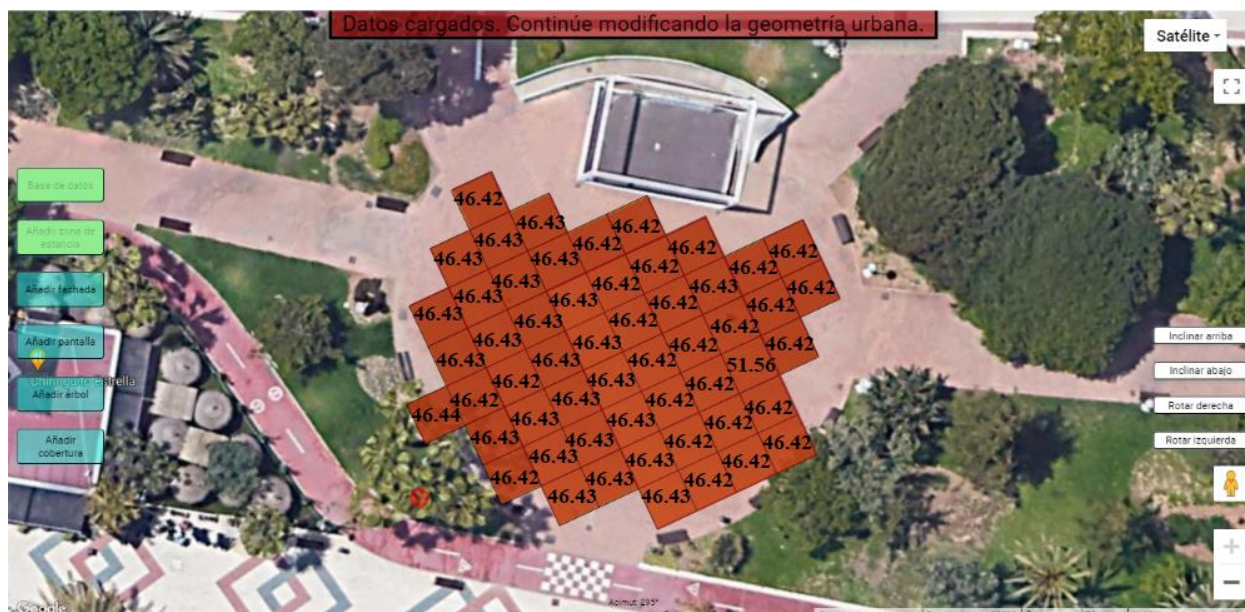


Ilustración 21: Resultados de temperaturas superficiales del caso base 2.

Los datos resultantes son preocupantes, puesto que cuando una estancia al aire libre registra temperaturas superficiales cercanas a los 47°C , esto genera problemas significativos en cuanto al confort térmico, afectando tanto la salud de las personas como su bienestar en ese entorno. Además, cuando las superficies, como el pavimento o las estructuras cercanas, alcanzan temperaturas de 47°C , emiten una gran cantidad de calor hacia su entorno, esto eleva la temperatura del aire circundante, haciendo que las personas perciban una sensación térmica mucho mayor a la real, lo que agrava la incomodidad en climas calurosos. Por poner un ejemplo, si la temperatura del aire es de 36°C , cuando el pavimento está mucho más caliente que la temperatura del aire podemos percibir esta última incluso 4°C más, haciendo que tengamos una sensación térmica de 40°C y que claramente nos genere malestar y no queramos hacer uso de estas estancias.

Como se ha discutido en el caso anterior, el cuerpo humano tiene mecanismos para regular su temperatura, como la sudoración y el flujo sanguíneo hacia la piel, pero estos mecanismos se ven comprometidos cuando la temperatura ambiente y de las superficies es demasiado alta. A temperaturas de superficie cercanas a los 47°C , el cuerpo lucha para disipar el calor, aumentando el riesgo de agotamiento por calor, deshidratación, golpes de calor y otros problemas de salud asociados con el estrés térmico.

A continuación, en la Ilustración [22] se expondrán los resultados del PET para este caso:

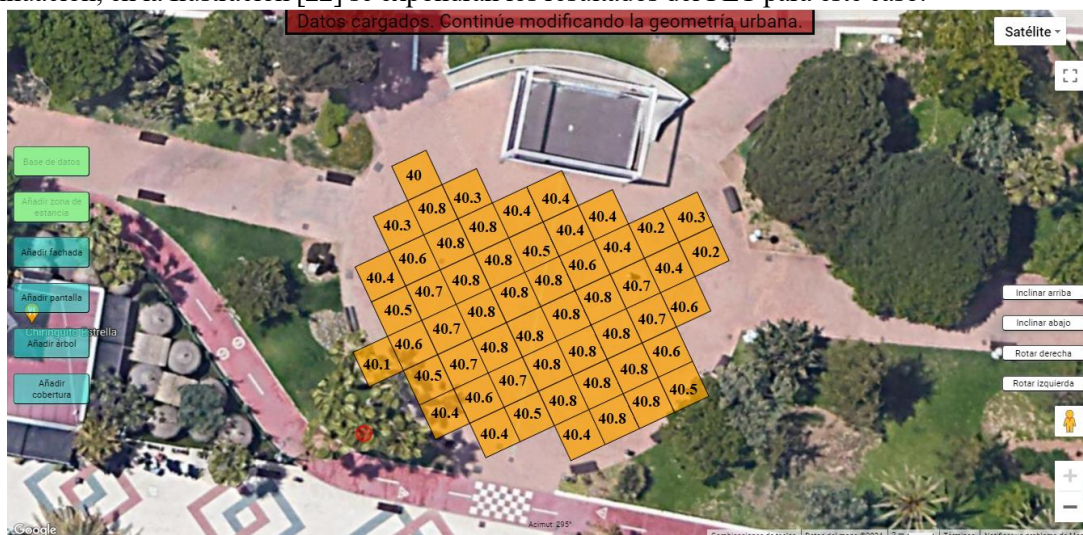


Ilustración 22: Resultados del parámetro PET para el caso base 2.

Al igual que en el caso 1, esta vez se presenta la misma problemática, valores cercanos al malestar extremo y a sensaciones térmicas también extremas. Como se ha mencionado el calor extremo puede generar irritabilidad, agotamiento y otros síntomas de fatiga térmica y desincentiva el uso de esos espacios. Los usuarios tenderán a evitarlos, especialmente en las horas más calurosas del día, lo que reduce la funcionalidad del espacio al aire libre. Aparte de los problemas de salud que podrían ocasionar que se han discutido en el caso anterior.

2.2.2.1 Propuestas de mejora

Ya que los casos tienen la misma problemática, se han aplicado soluciones muy parecidas, pero cambiando detalles. En este caso se ha cambiado el pavimento por la misma losa que en el caso anterior y se han colocado los mismos toldos, añadiendo vegetación en los alrededores para bajar en la medida de lo posible las temperaturas.

A diferencia de los otros dos casos, en este se ha pensado en el uso de esta estancia, puesto que aunque las mejoras ayuden en el confort térmico no hará que las personas quieran ocupar este área porque está vacía y no hay ninguna actividad que puedan ejercer en el día. En este caso se ha pensado colocar mesas de madera con bancos para que se haga uso de este espacio, bien sea a la hora de comer o después del mediodía como un lugar para poder descansar y hacer actividades de baja intensidad.

Se han escogido estas mesas plegables para que cuando se necesite el espacio para otra actividad se puedan almacenar.



Conjunto compuesto de 2 bancos 220 x 25 cm, 1 mesa 220 x 50 cm, marrón.

Se ha buscado una mesa que cumpliera con los requisitos generales de seguridad para uso comercial en exteriores.

2.2.3 Caso 3

El caso 3 se trata de una zona de paso del paseo marítimo, las características de la zona son parecidas a los otros dos casos y se aprecia que, aunque hay algunas áreas verdes con árboles y vegetación, son escasas y no cubren la mayor parte del espacio, lo que se observa en que gran parte del suelo está expuesto a la radiación solar directa.

Este caso es interesante pues se ha tomado como zona es representativa del paseo marítimo, ya que gran parte del camino utiliza los mismos materiales y elementos que en el resto del paseo. Si se lleva a cabo una rehabilitación en esta sección, los resultados podrían extrapolarse al resto del paseo, mejorando la eficiencia energética y el confort térmico en toda la zona.



Ilustración 23: A la izquierda, vista aérea desde Google maps, a la derecha vista real de la zona de paso

Se comenzó el análisis con la situación inicial del emplazamiento, los problemas a tratar son iguales que en los demás, puesto que todos tienen los siguientes factores:

- Falta de sombra, por lo cual las personas reciben radiación directa. En estaciones calurosas supone un problema que teniendo en cuenta el clima podría llegar a afectar gravemente a la salud.
- Suelos que absorben la mayor parte de radiación y reflejan un pequeño porcentaje de esta (albedo bajo). Esto nos lleva a que el suelo almacene calor y al pasar por encima o hacer uso de ellos nos sentimos disconformes debido a la radiación térmica que nos trasmite.

Utilizando el programa “Cartuja Canat” junto con los datos climáticos integrados de los meses de verano de la localidad, se ha generado un mallado sobre el área de estudio. El programa permite la creación de cuadrículas numeradas de izquierda a derecha y de arriba hacia abajo, siendo que cada celda representa 3m² en la realidad, y se han obtenido datos específicos para cada una de ellas. Para realizar una comparación exhaustiva, se ha seleccionado la hora más desfavorable, a las cuatro de la tarde, obteniendo así los siguientes resultados, con especial énfasis en las temperaturas superficiales y el PET. Otros parámetros como la temperatura del aire, la carga térmica y la radiación absorbida se comentarán brevemente, aunque sus resultados completos se incluirán en los anexos. En la Ilustración [26] se muestran los resultados de este análisis.



Ilustración 24: Resultados de las temperaturas de junio del caso base 3 a las cuatro de la tarde.

Se observa que los resultados no varían apenas de los otros casos, a excepción en las zonas verdes, que por supuesto tienen un albedo mayor y refrescan de por sí el ambiente, haciendo que los resultados de una temperatura superficial más baja sean razonables.

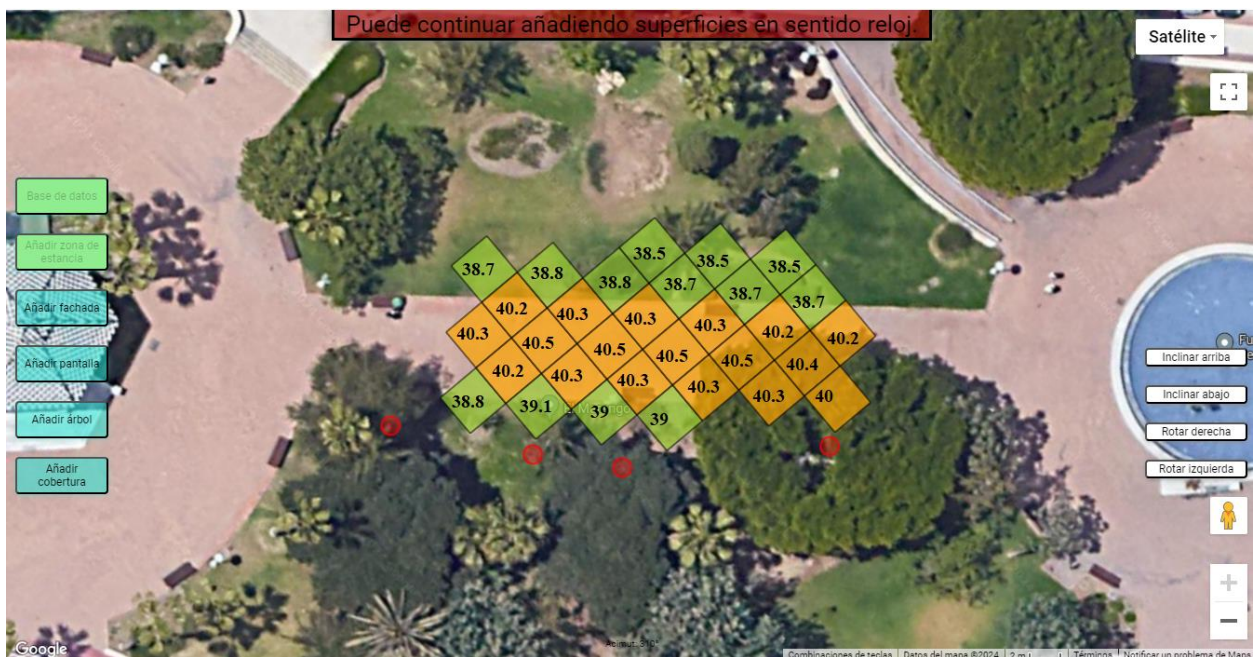


Ilustración 25: Resultados del parámetro PET del caso base 3.

Como en los casos anteriores, nuevamente se presenta la misma problemática: valores cercanos al malestar extremo y sensaciones térmicas insoportables. El calor excesivo, como se ha mencionado, puede provocar irritabilidad, agotamiento y otros síntomas de fatiga térmica, lo que desincentiva el uso de estos espacios. Los usuarios tienden a evitarlos, especialmente durante las horas más calurosas del día, reduciendo así la funcionalidad de las áreas al aire libre. Además, esto conlleva riesgos para la salud que se han abordado en los casos anteriores.

2.4.1.1 Propuestas de mejora

Dado que los casos presentan la misma problemática, se han implementado soluciones similares, ajustando algunos detalles. En este caso, se ha reemplazado el pavimento con la misma losa utilizada anteriormente y se han instalado los mismos toldos, añadiendo árboles en los alrededores para reducir las temperaturas en la medida de lo posible.

En general, se han seleccionado mejoras básicas basadas en el criterio del confort. En primer lugar, se deben proporcionar elementos que generen sombra. Posteriormente, se debe sustituir el pavimento por uno con un alto albedo. Finalmente, se podrían añadir elementos de agua o, en caso de contar con un mayor presupuesto o proyecto, implementar un plan para instalar elementos pasivos de refrigeración, como pasillos con techos que permitan la incorporación de vegetación.

En este estudio, se ha decidido no incluir elementos de agua debido a la falta de recursos hídricos en la zona, que ha estado en temporada de sequía durante dos años y las restricciones para el uso del agua lleva un año entero en vigor pues las precipitaciones han sido muy bajas o nulas a lo largo de los años anteriores.

2.5 Resultados

Después de analizar todos los casos se van a mostrar los resultados obtenidos con las mejoras que se han propuesto en el apartado anterior, dichos resultado se discutirá a continuación.

2.5.1 Caso 1

Para este caso se han obtenido los siguientes resultados:

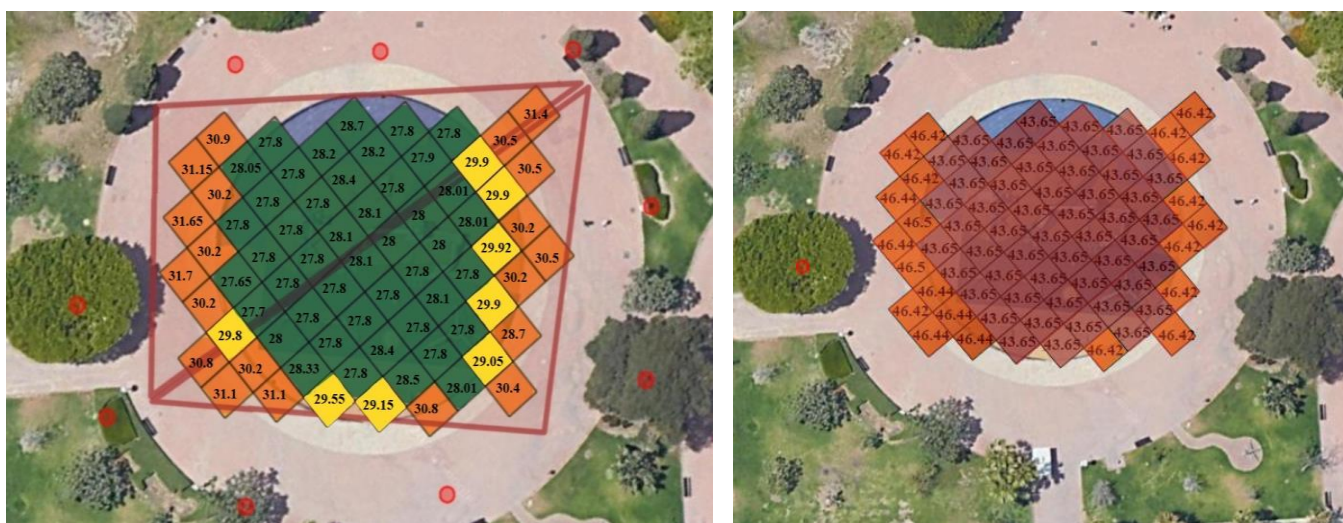
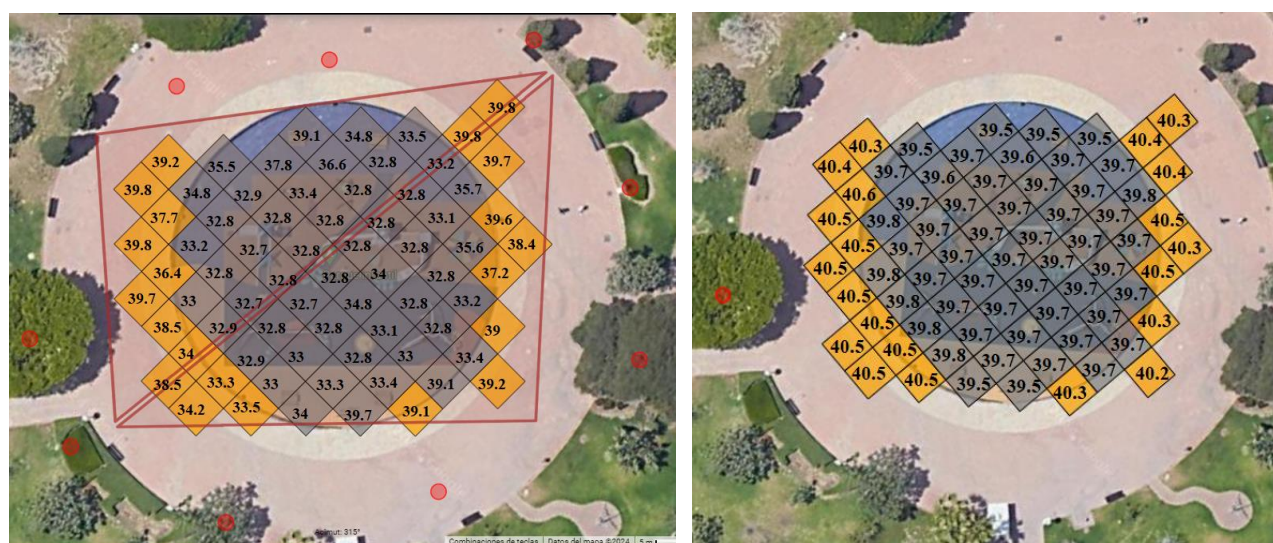


Ilustración 26: Comparación de los resultados de la mejora con el caso base para las temperaturas superficiales.

En la ilustración siguiente se pueden ver los resultados del PET del caso mejorado:



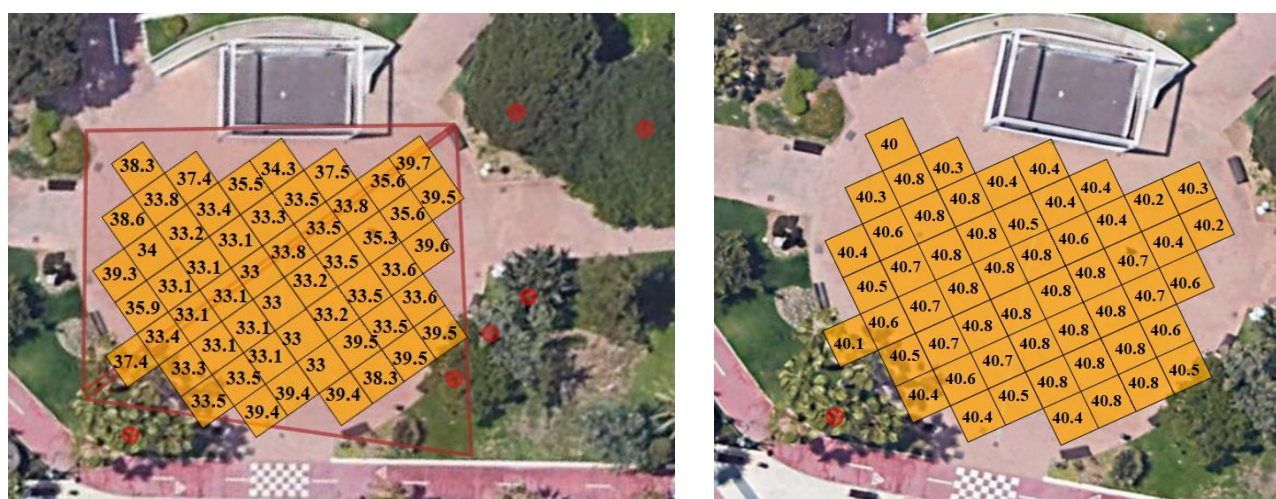
2.5.2 Caso 2

Después del análisis se han obtenido estos resultados de temperaturas superficiales para la mejora del caso 2:



Ilustración 28: Comparación de los resultados de la mejora con el caso base 2 para las temperaturas superficiales.

A continuación, se pueden ver los resultados del PET para la simulación de la mejora en el caso 2:



2.5.3 Caso 3

En la siguiente ilustración se observan los resultados para las temperaturas finales de la mejora en el caso 3:

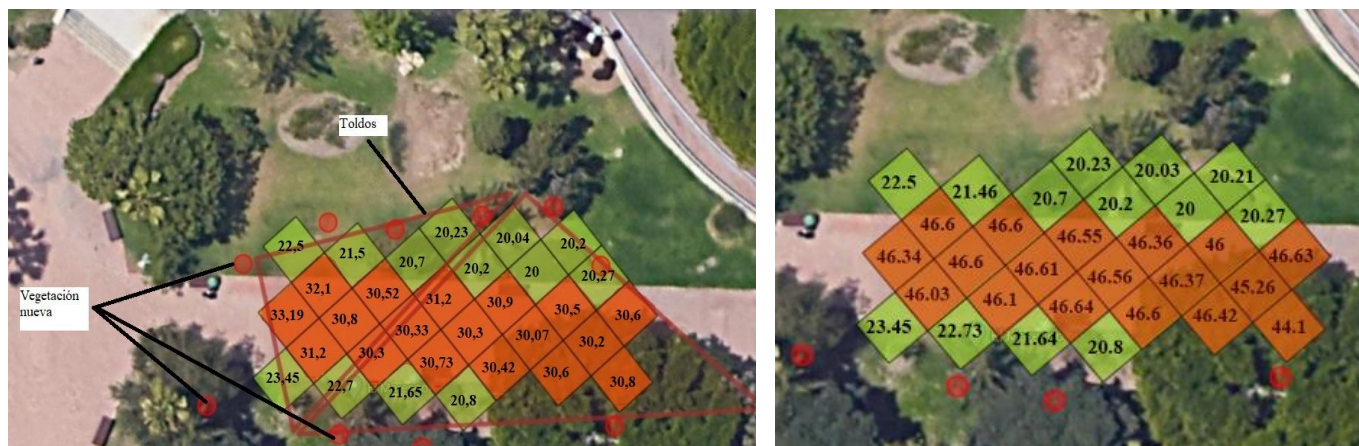


Ilustración 30: Comparación de los resultados de la mejora con el caso base 3 para las temperaturas superficiales.

Por último, tenemos los resultados del PET para la mejora del caso 3:

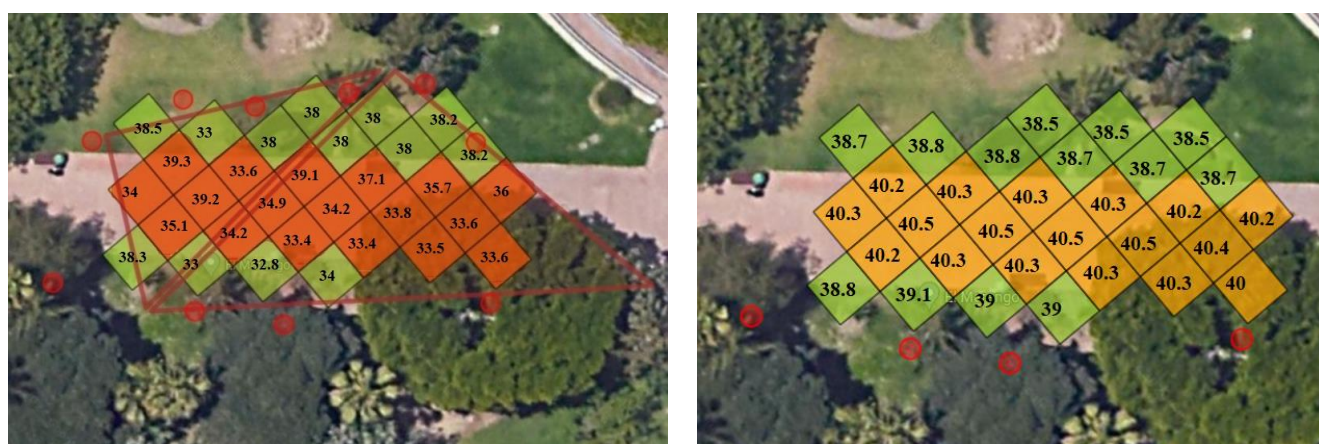


Ilustración 31: Comparación del resultado de la mejora con el caso base 3 para el análisis del PET.

2.5.4 Discusión general de resultados

Se ha procedido a hacer un resumen de los resultados pues en los tres casos comparten similitudes, es por esto por lo que se ha decidido agruparlos en un solo apartado.

Para los resultados de la Temperatura Superficial, se puede apreciar la mejoría de todas las zonas, logrando una mejora significativa en el confort térmico y el uso de dichos espacios. En los casos base, la temperatura superficial rondaba entre los 44°C y los 46,5°C, un nivel extremadamente alto que generaba incomodidad y ponía en riesgo la salud de los usuarios, especialmente durante las horas más calurosas del día. Tras la intervención, que incluyó la instalación de toldos para proporcionar sombra y la sustitución del pavimento por materiales de colores más claros que reflejan la radiación solar en lugar de absorberla, la temperatura superficial ha descendido a unos niveles mucho más manejables, entre los 33°C y los 28°C, una mejoría significativa. Esta reducción de aproximadamente 16°C no solo mejora el bienestar térmico, permitiendo que las personas puedan disfrutar del espacio de manera más prolongada y segura, sino que también fomenta un uso más eficiente del área durante el día. Además, se reduce el riesgo de problemas de salud asociados con la exposición prolongada al calor extremo. En conjunto, estas mejoras no solo revitalizan la zona, sino que también contribuyen a su funcionalidad.

Se observa que las celdas más cercanas al límite de la sombra tienen peores resultados, pero esto es totalmente lógico puesto que están en contacto con el entorno sin elementos de sombra y con un albedo bajo, aumentando así la temperatura superficial de casillas cercanas.

Los resultados del PET reflejan que la rehabilitación de la zona ha resultado en una notable mejora del confort térmico. En el caso base, el valor del PET rondaba los 40°C, lo que indica condiciones extremas de malestar térmico, con riesgo de estrés por calor para los usuarios. Tras las intervenciones, el PET ha disminuido a 33°C aproximadamente. Esta reducción de 7°C supone un cambio significativo, ya que las sensaciones térmicas se acercan mucho más a un nivel de confort aceptable, permitiendo que las personas puedan permanecer al aire libre por periodos más largos sin experimentar agotamiento o malestar extremo. Los datos de la temperatura media radiante, la carga térmica, así como de la radiación solar absorbida, se encuentran detallados para cada caso en los anexos, en esta sección se mencionarán las mejoras obtenidas a grandes rasgos junto con las principales conclusiones obtenidas en este trabajo de fin de grado:

1. La Temperatura Superficial ha disminuido aproximadamente un 34% para todos los casos.
2. El PET ha bajado un 17'5% para la mayoría de los casos.
3. El porcentaje de mejora de la radiación solar absorbida ha mejorado entre un 80% y un 90% para los casos.
4. La disminución de la carga térmica (Q) ha sido de entre un 30% y un 34% en todos los casos.
5. La temperatura radiante media ha mejorado entre un 12'7% y un 19'5 para los casos.
6. Las mejoras implementadas no han tenido influencia en la temperatura del aire, ya que es un espacio abierto y no estacionario.

3 CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

3.1 Conclusiones

En este Trabajo de Fin de Grado se han simulado distintos escenarios para analizar la problemática real existente en dichas zonas. Para fortalecer los resultados de la simulación, los modelos energéticos integraron tanto información cualitativa sobre el comportamiento humano en relación con el uso de la energía como datos cuantitativos, obtenidos a través de ensayos y la monitorización de las principales variables ambientales y datos climáticos del municipio. Se diagnosticó el estado actual de las estancias y las conclusiones obtenidas sirvieron para diseñar propuestas de rehabilitación parcial que posteriormente se compararon con los modelos base después de ejecutar un análisis de las mejoras. Estas propuestas incluyeron medidas pasivas y activas que respetaban y favorecían al paisaje urbano circundante. Los resultados de la simulación demostraron que la implementación de dichas medidas aumentaba notablemente el confort térmico y mejoraba tanto las condiciones ambientales de las áreas de estudio, como la salubridad de las personas que hacen uso de ellas. Como resultado, el confort térmico se aproximó significativamente a ser apto para la ocupación de la estancia, obteniéndose unos resultados de mejora de la temperatura superficial de aproximadamente un 33,7%, mientras que el PET ha mejorado alrededor de un 17,63%.

Para alcanzar este resultado, se comenzó con un análisis de las zonas de área urbana seleccionadas para la experimentación, el parque de niños, la plaza de conciertos y una zona parte de una zona de paso que se prolonga a lo largo del paseo marítimo. En la metodología, uno de los pasos fundamentales fue desarrollar un estudio climático previo del entorno urbano, previamente seleccionado, cuyos resultados, daban claros indicios de tener un clima que con el cambio climático solo iba a ir a peor y era necesario tener unas estrategias a seguir para abordar los futuros problemas que se generarían. Posteriormente se pensó en una serie de mejoras después de consultar artículos, tesis, conferencias...etc. Relacionadas con este problema, así se llegó a la conclusión de que la mejor solución empezaría por saber qué recursos y estrategias se podrían implementar en la zona y cuáles no. Es por ello por lo que se decidió no contemplar el añadir masas de agua por la falta de esta en el área estudiada.

En conjunto, este análisis permitió valorar el impacto significativo de la importancia de tener sombra en los meses cálidos, así como tener un pavimento urbano que no suponga ser una esponja de la radiación solar y por último la necesidad de tener espacios verdes en el paisaje urbano. Con este trabajo se ha visto que grandes cambios en la habitabilidad de las estancias son posibles con pequeñas mejoras, convirtiendo espacios de entornos térmicos extremadamente calurosos a superficies aptas para el uso y disfrute de los mismos hasta en las situaciones más desfavorables.

Después del análisis de los casos base, el estudio de las propuestas de mejora y de la simulación de los modelos mejorados se ha llegado a unos resultados muy deseados, que se piensa que en un futuro pueden incluso mejorar partiendo de lo obtenido.

3.2 Líneas Futuras

Para completar este análisis también se estudió la posibilidad de poner nebulizadores en la mejora del caso 2 como complemento de las mejoras propuestas, en las condiciones actuales es imposible poner una refrigeración con agua, pero existen otras soluciones como estos dispositivos, pues rocían pequeñas gotitas de agua que absorben rápidamente el calor, lo que mejoraría una gran parte de los datos iniciales para el caso 2. El desarrollo de esta idea viene acompañado por aprovechar los suelos permeables del caso 1 para reunir agua y filtrarla, con ello se aprovecharían las pocas lluvias del año y no se haría uso de los escasos recursos hídricos de la zona.

Esta mejora es un poco más costosa, se tendría que poner un almacén de agua subterráneo o bien que esté bien aislado, pues al estar resguardado, este conservaría una temperatura más baja y el intercambio de energía entre el agua y el exterior será más rápido cuando entre en contacto con él, a su vez se tienen que poner pequeños tubos de una estancia a otra para el transporte del agua.

En la siguiente ilustración se pueden ver los nebulizadores elegidos.



Ilustración 32: Nebulizadores para el caso 2.

Para concluir, se quiere recalcar que en este apartado se han pensado en implementar y complementar las mejoras ya propuestas en este trabajo, pues también se ha comentado que es posible desarrollar más propuestas como pasillos vegetales, que tengan posean una cubierta verde. Una propuesta muy ambiciosa pero que tendría cabida para un estudio, podría ser usar el agua del mar como refrigerante, pero para ello necesitaríamos bombas de agua especiales para agua salada y unos conductos subterráneos en los que el agua siempre esté en movimiento.

4 ANEXOS

A continuación, se presentarán los resultados de las simulaciones en forma de tablas. Como se ha comentado anteriormente en este trabajo, aquí se recopilan los datos de la radiación absorbida, la carga térmica (Q) y la temperatura radiante media (Trm) para cada uno de los resultados de los casos, tanto los casos base como para sus mejoras.

4.1 Resultados caso 1

En la siguiente tabla se pueden observar los resultados para el resto de los parámetros del confort mencionados anteriormente, se puede ver que las condiciones iniciales son un tanto nefastas, esto se ha aprovechado para tener buen margen de mejora.

Celdas	Q[W/m2]	Trm[°C]	Temp.Aire[°C]	Rad.Absorbida[W/m2]
1	105.85	34.002	35.768	311.88
2	105.99	34.100	35.768	311.56
3	105.97	34.163	35.768	311.38
4	106.57	34.421	35.768	311.50
5	107.08	34.563	35.768	311.88
6	107.03	34.589	35.768	311.69
7	105.83	34.094	35.768	311.88
8	106.28	34.276	35.768	311.50
9	106.83	34.574	35.768	311.50
10	102.80	33.715	35.768	400.94
11	102.75	33.733	35.768	400.94
12	102.79	33.782	35.768	400.69
13	102.17	33.477	35.768	400.94
14	101.39	33.168	35.768	400.81
15	105.77	33.987	35.768	311.88
16	106.80	34.497	35.768	311.88
17	102.94	33.835	35.768	400.62
18	102.40	33.707	35.768	400.69
19	102.26	33.672	35.768	400.69
20	102.21	33.601	35.768	400.94
21	102.33	33.660	35.768	400.81
22	101.89	33.423	35.768	400.94
23	101.38	33.145	35.768	400.88
24	105.52	33.948	35.768	311.88
25	102.44	33.533	35.768	400.94
26	102.39	33.638	35.768	400.94
27	102.13	33.574	35.768	400.94
28	102.17	33.644	35.768	400.81
29	102.28	33.661	35.768	400.81
30	102.32	33.618	35.768	400.94
31	102.31	33.643	35.768	400.88

32	102.09	33.462	35.768	400.94
33	105.22	33.890	35.768	311.88
34	101.38	33.131	35.768	400.94
35	101.89	33.439	35.768	400.94
36	102.27	33.663	35.768	400.81
37	102.32	33.613	35.768	400.94
38	102.40	33.639	35.768	400.94
39	102.29	33.632	35.768	400.88
40	102.19	33.595	35.768	400.94
41	102.23	33.596	35.768	400.88
42	101.92	33.333	35.768	400.94
43	101.55	33.275	35.768	400.81
44	102.22	33.573	35.768	400.94
45	102.40	33.620	35.768	400.94
46	102.31	33.652	35.768	400.88
47	102.12	33.581	35.768	400.94
48	102.20	33.627	35.768	400.88
49	102.38	33.634	35.768	400.94
50	102.14	33.423	35.768	400.94
51	104.91	33.707	35.768	311.88
52	101.14	33.040	35.768	400.88
53	101.93	33.419	35.768	400.94
54	102.22	33.606	35.768	400.94
55	102.16	33.589	35.768	400.94
56	102.10	33.580	35.768	400.94
57	102.36	33.644	35.768	400.94
58	102.36	33.534	35.768	400.94
59	105.65	34.049	35.768	311.88
60	101.19	33.072	35.768	400.94
61	101.83	33.436	35.768	400.88
62	102.18	33.607	35.768	400.94
63	102.36	33.627	35.768	400.88
64	102.58	33.628	35.768	400.94
65	106.19	34.269	35.768	311.88
66	101.27	33.103	35.768	400.94
67	102.34	33.550	35.768	400.94
68	102.53	33.597	35.768	400.94
69	106.21	34.277	35.768	311.88
70	105.54	33.926	35.768	311.88
71	105.93	34.123	35.768	311.88
72	105.78	34.052	35.768	311.88
73	105.49	34.031	35.768	311.88
74	105.79	34.327	35.768	311.89
75	105.85	34.376	35.768	311.90

Tabla 4: Resultados de la simulación del caso base 1 para las 16:00h

En la Tabla [5] se puede ver como los parámetros tienen valores más estables para el uso de esta estancia en comparación a los anteriores. La carga térmica ha disminuido aproximadamente un 30'1%, la temperatura radiante media en un 19'5%, por último, la radiación absorbida se reduce poco más de un 80%, esto varía de una casilla a otra, por eso es un valor estimado.

Se supone así que los resultados obtenidos son favorables.

Celda	Q[W/m2]	Trm[°C]	Temp.Aire[°C]	Rad.Absorbida[W/m2]
1	95.887	28.375	35.768	64.562
2	74.523	28.495	35.768	30.875
3	102.14	28.688	35.768	76.625
4	95.782	28.317	35.768	62.500
5	73.182	27.787	35.768	27.375
6	70.035	27.930	35.768	49.375
7	70.689	28.301	35.768	73.750
8	102.57	28.705	35.768	76.438
9	85.087	28.032	35.768	61.875
10	68.548	26.968	35.768	40.000
11	67.871	26.966	35.768	45.625
12	67.907	27.107	35.768	52.500
13	68.453	27.311	35.768	63.750
14	73.212	27.679	35.768	60.875
15	102.58	28.539	35.768	77.125
16	91.743	27.942	35.768	74.938
17	69.356	27.218	35.768	36.250
18	67.572	27.098	35.768	33.750
19	67.059	26.969	35.768	37.500
20	67.482	27.193	35.768	35.625
21	67.551	26.985	35.768	44.375
22	68.240	27.206	35.768	66.250
23	69.788	27.920	35.768	10.312
24	102.26	28.387	35.768	77.062
25	99.537	27.298	35.768	112.06
26	77.161	26.911	35.768	60.062
27	67.241	26.879	35.768	26.875
28	67.212	27.228	35.768	31.875
29	67.361	27.245	35.768	31.875
30	67.084	26.877	35.768	31.875
31	67.314	26.856	35.768	43.750
32	68.104	27.210	35.768	66.875
33	70.591	28.438	35.768	73.125
34	99.041	27.431	35.768	113.31
35	80.761	27.025	35.768	69.562
36	68.193	27.008	35.768	31.250
37	67.693	27.165	35.768	28.750
38	67.566	27.294	35.768	30.625
39	66.950	26.972	35.768	24.375
40	77.067	26.893	35.768	31.250
41	69.149	26.876	35.768	26.750

42	68.550	27.335	35.768	76.250
43	98.884	27.246	35.768	112.44
44	92.169	26.981	35.768	110.75
45	70.189	27.016	35.768	25.188
46	67.373	26.983	35.768	31.875
47	66.864	27.016	35.768	28.125
48	73.384	27.011	35.768	28.750
49	71.654	26.919	35.768	60.500
50	68.130	27.076	35.768	63.125
51	70.473	28.363	35.768	71.250
52	99.786	27.641	35.768	115.06
53	99.217	27.128	35.768	111.75
54	86.185	27.211	35.768	79.812
55	67.859	26.869	35.768	40.000
56	67.257	27.195	35.768	26.875
57	67.198	27.020	35.768	34.375
58	67.714	27.085	35.768	45.000
59	69.290	27.810	35.768	50.000
60	99.879	27.895	35.768	114.19
61	98.566	27.143	35.768	112.25
62	77.235	27.080	35.768	60.938
63	67.809	27.000	35.768	39.375
64	67.486	27.107	35.768	41.250
65	69.015	27.908	35.768	43.750
66	81.100	27.347	35.768	48.562
67	89.256	27.241	35.768	77.562
68	70.771	27.250	35.768	26.938
69	69.577	27.975	35.768	43.125
70	81.688	28.478	35.768	65.625
71	101.95	28.169	35.768	76.812
72	95.410	28.316	35.768	76.500
73	102.77	28.687	35.768	79.625
74	101.83	28.547	35.768	76.846
75	102.84	29.703	35.768	79.679

Tabla 5: Resultados de la simulación del caso mejorado 1 para las 16:00h.

4.2 Resultados del caso 2

En la tabla [6], que está a continuación, se presentan los resultados correspondientes a los demás parámetros de confort mencionados previamente. Se observa que las condiciones iniciales, como en el primer caso, son algo desfavorables, lo que ha permitido contar con un amplio margen de mejora

Celda	Q[W/m2]	Trm[°C]	Temp.Aire[°C]	Rad.Absorbida[W/m2]
1	104,49	33,534	35,768	311,22
2	105,86	34,201	35,768	311,56
3	106,37	34,232	35,768	311,44
4	106,94	34,401	35,768	311,78
5	106,39	34,265	35,768	311,22
6	105,88	34,172	35,768	311,78
7	105,41	33,82	35,768	311,78
8	107,15	34,49	35,768	311,67
9	107,68	34,737	35,768	311,56
10	107,74	34,734	35,768	311,78
11	107,63	34,726	35,768	311,44
12	107,08	34,498	35,768	311,44
13	105,88	34,167	35,768	311,78
14	104,2	33,347	35,768	311,78
15	106,73	34,301	35,768	311,78
16	107,49	34,615	35,768	311,67
17	107,96	34,834	35,768	311,67
18	107,98	34,887	35,768	311,67
19	107,91	34,822	35,768	311,78
20	107,56	34,669	35,768	311,78
21	106,44	34,247	35,768	311,67
22	105,61	33,899	35,768	311,78
23	107,38	34,581	35,768	311,78
24	107,77	34,769	35,768	311,78
25	107,85	34,801	35,768	311,78
26	107,85	34,801	35,768	311,78
27	107,77	34,769	35,768	311,78
28	107,27	34,538	35,768	311,78
29	105,88	34,167	35,768	311,78
30	106,39	34,21	35,768	311,78
31	107,47	34,638	35,768	311,78
32	107,85	34,801	35,768	311,78
33	107,84	34,821	35,768	311,78
34	107,91	34,843	35,768	311,78
35	107,47	34,633	35,768	311,78
36	106,09	34,076	35,768	311,78
37	105,89	34,167	35,768	311,78
38	107,07	34,465	35,768	311,78

39	107,61	34,712	35,768	311,78
40	107,93	34,869	35,768	311,78
41	107,8	34,915	35,768	311,78
42	107,3	34,57	35,768	311,78
43	105,93	34,02	35,768	311,78
44	105,68	33,941	35,768	311,78
45	107,44	34,624	35,768	311,78
46	107,59	34,815	35,768	311,78
47	106,98	36,019	35,768	400,89
48	106,21	34,278	35,768	311,78
49	105	33,691	35,768	311,78
50	106,16	34,103	35,768	311,78
51	106,89	34,395	35,768	311,78
52	105,63	34,079	35,768	311,78
53	104,88	33,603	35,768	311,78
54	104,97	33,655	35,768	311,78

Tabla 6: Resultados de la simulación del caso base 2 para las 16:00h

En la siguiente tabla, se aprecia la mejoría que han proporcionado las propuestas para este caso y se puede observar que la carga térmica ha disminuido aproximadamente un 34%, la temperatura radiante media en un 14%, para terminar, la radiación absorbida se reduce poco más de un 90%.

Celda	Q[W/m2]	Trm[°C]	Temp.Aire[°C]	Rad.Absorbida[W/m2]
1	90.461	28.775	35.768	65.000
2	100.36	28.633	35.768	76.556
3	82.585	28.482	35.768	48.000
4	70.538	28.121	35.768	43.333
5	69.915	28.281	35.768	48.889
6	70.709	28.470	35.768	72.222
7	96.585	28.338	35.768	76.222
8	73.725	28.002	35.768	26.556
9	69.908	27.944	35.768	28.889
10	68.967	28.032	35.768	12.444
11	69.005	28.100	35.768	31.111
12	69.353	28.151	35.768	43.333
13	70.979	28.699	35.768	71.111
14	100.70	28.524	35.768	77.778
15	94.797	27.977	35.768	75.000
16	72.586	27.849	35.768	17.222
17	69.421	27.950	35.768	23.333
18	68.792	28.031	35.768	26.667
19	68.456	27.977	35.768	24.444

20	68.722	28.034	35.768	28.889
21	69.510	28.243	35.768	43.333
22	100.89	28.430	35.768	75.444
23	90.109	28.025	35.768	74.000
24	70.306	27.938	35.768	22.222
25	68.804	27.985	35.768	24.444
26	68.384	28.037	35.768	21.111
27	68.376	28.007	35.768	21.111
28	69.090	28.170	35.768	30.000
29	69.940	28.418	35.768	48.889
30	100.81	28.284	35.768	74.444
31	80.889	28.144	35.768	53.222
32	70.018	28.025	35.768	23.333
33	68.765	28.110	35.768	18.889
34	72.498	28.091	35.768	18.889
35	70.457	28.147	35.768	16.778
36	69.656	28.453	35.768	33.333
37	101.15	28.620	35.768	76.000
38	94.974	28.216	35.768	74.222
39	74.981	28.008	35.768	40.333
40	69.713	28.093	35.768	21.111
41	72.891	28.067	35.768	22.222
42	70.746	28.273	35.768	16.889
43	69.959	28.734	35.768	31.111
44	101.21	28.561	35.768	75.778
45	90.856	28.092	35.768	74.667
46	72.430	28.077	35.768	17.222
47	79.744	28.184	35.768	30.000
48	71.324	28.447	35.768	18.333
49	71.329	29.343	35.768	52.222
50	101.41	28.368	35.768	75.889
51	81.460	28.039	35.768	55.000
52	81.049	28.517	35.768	50.000
53	101.83	28.690	35.768	78.556
54	102.02	29.076	35.768	78.333

Tabla 7: Resultados de la simulación del caso mejorado 2 para las 16:00h

4.3 Resultados del caso 3

A continuación, en la tabla [8] se muestran los resultados de los demás parámetros de confort, discutidos previamente. Al igual que en los demás casos, se observa que las condiciones iniciales son desfavorables, lo que ha permitido obtener un amplio margen de mejora.

Celdas	Q[W/m2]	Trm[°C]	Temp.Aire[°C]	Rad.Absorbida[W/m2]
1	97,638	27,122	35,768	220,78
2	105,18	33,688	35,768	310,44
3	105,04	32,868	35,768	310
4	98,867	27,551	35,768	220,78
5	97,097	26,629	35,768	222,44
6	105,09	32,835	35,768	310,67
7	106,45	33,866	35,768	311
8	105,57	33,096	35,768	309,78
9	98,716	27,56	35,768	220
10	97,738	26,631	35,768	222,11
11	105,45	32,899	35,768	310,56
12	106,75	34,046	35,768	310,11
13	105,55	33,162	35,768	309,22
14	98,374	27,368	35,768	220,89
15	97,517	26,016	35,768	222,33
16	105,47	32,822	35,768	310,44
17	106,65	33,929	35,768	310,78
18	105,48	33,503	35,768	310,11
19	96,046	25,185	35,768	222,33
20	97,279	25,4	35,768	222,56
21	105,24	32,619	35,768	311
22	106,54	33,941	35,768	310,56
23	105,24	33,774	35,768	309,56
24	95,981	24,995	35,768	222,44
25	97,201	25,334	35,768	222,33
26	104,93	32,573	35,768	310,78
27	105,81	33,732	35,768	309,89
28	103,89	33,464	35,768	307
29	96,101	25,223	35,768	222,22
30	97,169	25,924	35,768	222,11
31	104,69	33,356	35,768	309,89

Tabla 8: Resultados de la simulación del caso base 3 para las 16:00h.

En la siguiente tabla, se aprecia el avance que han proporcionado las propuestas de mejora para este caso y se puede observar que la carga térmica ha disminuido en torno a un 30%, la temperatura radiante media en un 12'7%, la radiación absorbida se reduce aproximadamente un 90%, exceptuando algunas casillas de vegetación que no están totalmente cubiertas de la radiación directa.

Celdas	Q[W/m2]	Trm[°C]	T. Aire [°C]	Rad.Absorbida[W/m2]
1	95.211	26.807	35.768	204.44
2	73.528	29.408	35.768	12.333
3	78.733	28.303	35.768	51.222
4	68.591	26.613	35.768	16.889
5	95.764	27.174	35.768	201.89
6	100.05	28.584	35.768	116.78
7	99.465	28.250	35.768	114.78
8	74.094	27.894	35.768	64.000
9	67.492	26.370	35.768	14.333
10	68.626	26.455	35.768	17.000
11	71.168	27.939	35.768	68.889
12	77.926	28.074	35.768	47.667
13	70.167	27.984	35.768	63.333
14	73.537	26.423	35.768	15.889
15	93.466	25.403	35.768	193.56
16	98.938	27.785	35.768	113.44
17	74.525	28.038	35.768	62.111
18	70.313	28.197	35.768	70.000
19	93.655	25.449	35.768	198.44
20	93.512	24.749	35.768	191.89
21	88.758	27.696	35.768	112.56
22	72.181	27.958	35.768	25.333
23	70.819	28.652	35.768	80.000
24	93.181	25.027	35.768	196.22
25	93.571	24.795	35.768	191.33
26	81.635	27.690	35.768	114.00
27	71.183	28.314	35.768	73.333
28	71.572	29.322	35.768	93.333
29	94.509	26.032	35.768	198.67
30	94.635	25.988	35.768	195.78
31	83.029	28.982	35.768	76.222

Tabla 9: Resultados de la simulación del caso base 3 para las 16:00h.

REFERENCIAS

- [1] Enerdata, «GLOBAL ENERGY TRENDS 2024», Global, 2024.
- [2] «La Energía en España». [En línea]. Disponible en: www.miteco.gob.es
- [3] «Policy brief», 2020.
- [4] «ESTADO DE LA CERTIFICACIÓN ENERGÉTICA DE LOS EDIFICIOS (11º Informe)».
- [5] «ACCESO A LA EFICIENCIA ENERGÉTICA DE LAS PERSONAS CONSUMIDORAS EN ESPAÑA Estudio impulsado por CECU y elaborado por Simple Lógica».
- [6] «ESTRATEGIA NACIONAL CONTRA LA POBREZA ENERGÉTICA», 2019.
- [7] N. Santillán Soto *et al.*, «Análisis comparativo de emisiones de CO₂ y su impacto económico en dos complejos habitacionales de Mexicali, México», en *Clima, sociedad, riesgos y ordenación del territorio*, Servicio de Publicaciones de la UA, 2016, pp. 613-622. doi: 10.14198/xcongresoacalicante2016-58.
- [8] Md. Nuruzzaman, «Urban Heat Island: Causes, Effects and Mitigation Measures - A Review», *International Journal of Environmental Monitoring and Analysis*, vol. 3, n.º 2, p. 67, 2015, doi: 10.11648/j.ijema.20150302.15.
- [9] H. Altan, M. Hajibandeh, K. A. Tabet Aoul, y A. Deep, «Passive design», en *Springer Tracts in Civil Engineering*, Springer, 2016, pp. 209-236. doi: 10.1007/978-3-319-31967-4_8.
- [10] D. H. García y J. A. Díaz, «Spatial-Temporal Analysis of the Urban Heat Island Using Satellite Images: Capitals of Andalusia», *Architecture, City and Environment*, vol. 17, n.º 49, jun. 2022, doi: 10.5821/ace.17.49.10374.
- [11] M. J. Hewett *et al.*, «ASHRAE COMITE DE ESTANDAR 2000-2001». [En línea]. Disponible en: www.ashrae.org
- [12] «Reference number ISO 7730:2005(E) ISO 7730 Third edition», 2005.
- [13] R. Robledo-Fava *et al.*, «Analysis of the influence subjective human parameters in the calculation of thermal comfort and energy consumption of buildings», *Energies (Basel)*, vol. 12, n.º 8, abr. 2019, doi: 10.3390/en12081531.
- [14] A. Godoy Muñoz, «El confort térmico adaptativo».
- [15] P. O Fanger, «Assessment of man's thermal comfort in practice», 1973.
- [16] K. Simancas Yovane, «El confort en el diseño bioclimático», 2010.
- [17] P. Zbikowski *et al.*, «Trabajo Fin de Máster».
- [18] D. Royé y A. Martí Ezpeleta, «La aplicación del índice bioclimático PET al noroeste de España para la delimitación de espacios con estrés térmico», 2011. [En línea]. Disponible en: <https://www.researchgate.net/publication/291343868>
- [19] P. Höppe, «The physiological equivalent temperature – a universal index for the biometeorological assessment of the thermal environment», *Int J Biometeorol*, pp. 71-75, 1999.
- [20] M. Á. Saz, S. M. Vicente-Serrano, M. A. Saz Sánchez, S. M. V. Serrano, y J. M. Cuadrat Prats, «Spatial patterns estimation of urban heat island of Zaragoza (Spain) using GIS», 2003. [En línea]. Disponible en: <https://www.researchgate.net/publication/267414275>
- [21] T. Asaeda y V. C. Thanh, «Atmospheric Environment», 1996.
- [22] K. Bjella, «ERDC/CRREL TR-13-8 “Thule Air Base Airfield White Painting and Permafrost Investigation”», 2013.

- [23] H. Taha, D. Sailor, y H. Akbari, «High-albedo materials for reducing building cooling energy use», Berkeley, CA, ene. 1992. doi: 10.2172/10178958.
- [24] J. R. Simpson y E. G. McPherson, «The effects of roof albedo modification on cooling loads of scale model residences in Tucson, Arizona», *Energy Build*, vol. 25, n.º 2, pp. 127-137, ene. 1997, doi: 10.1016/S0378-7788(96)01002-X.
- [25] H. I. G. L. B. N. L. Hashem Akbari and Steven Konopacki, «THE IMPACT OF REFLECTIVITY AND EMISSIVITY OF ROOFS ON BUILDING COOLING AND HEATING ENERGY USE». Accedido: 7 de septiembre de 2024. [En línea]. Disponible en: HeatIsland.LBL.gov
- [26] Daniel Eric Sangines Coral, «Metodología de evaluación de la isla de calor urbana y su utilización para identificar problemáticas energéticas y de planificación urbana», 2013.
- [27] D. J. Sailor, «Sensitivity of coastal meteorology and air quality to urban surface characteristics», 1994.
- [28] E. G. McPherson, J. R. Simpson, y M. Livingston, «Effects of three landscape treatments on residential energy and water use in Tucson, Arizona», *Energy Build*, vol. 13, n.º 2, pp. 127-138, abr. 1989, doi: 10.1016/0378-7788(89)90004-2.
- [29] A. S. and S. K. Roozbeh Arabi*, «Benefits of green roofs; a review paper», *Elixir Sustain*, 2014.
- [30] S. Onmura, M. Matsumoto, y S. Hokoi, «Study on evaporative cooling effect of roof lawn gardens».
- [31] R. Kumar y S. C. Kaushik, «Performance evaluation of green roof and shading for thermal protection of buildings», *Build Environ*, vol. 40, n.º 11, pp. 1505-1511, nov. 2005, doi: 10.1016/j.buildenv.2004.11.015.
- [32] D. Narumi, A. Kondo, y Y. Shimoda, «Effects of anthropogenic heat release upon the urban climate in a Japanese megacity», *Environ Res*, vol. 109, n.º 4, pp. 421-431, may 2009, doi: 10.1016/j.envres.2009.02.013.
- [33] Y. Kikegawa, Y. Genchi, H. Yoshikado, y H. Kondo, «Development of a numerical simulation system toward comprehensive assessments of urban warming countermeasures including their impacts upon the urban buildings' energy-demands», *Appl Energy*, vol. 76, n.º 4, pp. 449-466, dic. 2003, doi: 10.1016/S0306-2619(03)00009-6.
- [34] Y. Martín y P. Paneque, «ADAPTACIÓN URBANA AL CALOR EXTREMO», Sevilla.
- [35] A. Urano, T. Ichinose, y K. Hanaki, «Thermal environment simulation for three dimensional replacement of urban activity», *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 81, n.º 1-3, pp. 197-210, may 1999, doi: 10.1016/S0167-6105(99)00017-3.