

Proyecto Fin de Carrera Ingeniería de la Energía

Evaluación de pavimentos fríos para su integración en Emiratos Árabes

Autor: Marta Millán Gómez

Tutor: María del Carmen Guerrero Delgado

**Dpto. de Ingeniería Energética
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla**

Sevilla, 2024



Proyecto Fin de Carrera
Ingeniería de la Energía

Evaluación de pavimentos fríos para su integración en Emiratos Árabes

Autor:

Marta Millán Gómez

Tutor:

María del Carmen Guerrero Delgado

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

Autor: Marta Millán Gómez

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 mi familia, por creer siempre en
mí, incluso cuando yo no lo hice.*

*A mis compañeros, por el apoyo
incondicional.*

Agradecimientos

En primer lugar, agradezco a mi tutora, María del Carmen Guerrero Delgado, por su inestimable guía, apoyo y paciencia a lo largo de este proyecto. Su experiencia y consejos han sido fundamentales para la realización de este trabajo.

Agradezco también a mis profesores y compañeros de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de la Universidad de Sevilla, cuyas enseñanzas y colaboraciones han sido esenciales para mi formación académica y personal.

Un especial agradecimiento a mi familia, por su constante apoyo, ánimo y comprensión durante todo el proceso. Sin su amor y confianza, este logro no hubiera sido posible.

Marta Millán Gómez

Sevilla, 2024

Resumen

El cambio climático ha cobrado una importancia sin precedentes en las últimas décadas, convirtiéndose en un tema crucial a nivel global. Esto ha llevado a reconocer sus consecuencias negativas tanto para el planeta como para la vida humana. La diferencia de temperatura entre las áreas urbanas y las zonas rurales adyacentes se conoce como Isla de Calor Urbana (ICU), fenómeno influenciado por los materiales utilizados en la construcción de edificios y espacios urbanos. Los pavimentos son especialmente relevantes en este contexto, ya que constituyen una gran parte de las superficies urbanas. Su color oscuro y bajo albedo contribuyen a un aumento significativo de la temperatura superficial, almacenando una considerable cantidad de calor que posteriormente es emitida al ambiente. El uso de pavimentos fríos se considera una estrategia clave para mitigar los efectos de las Islas de Calor Urbana.

El objetivo principal de este trabajo es abordar y resolver el problema de las altas temperaturas en las superficies de los pavimentos en parques acuáticos de Dubái, sirviendo además como guía para que otros usuarios puedan enfrentar problemas similares.

Se ha estudiado el comportamiento de los pavimentos cuando se moja su superficie inferior con agua para determinar la reducción en la temperatura superficial en comparación con los materiales convencionales expuestos al sol. Esta estrategia mejora los indicadores de confort térmico para los ciudadanos y contribuye a mitigar el efecto de la ICU, reduciendo la temperatura ambiente en las áreas urbanas mediante el uso de recursos naturales y adaptando los pavimentos a las necesidades de mitigación.

Abstract

Climate change has gained unprecedented importance in recent decades, becoming a crucial global issue. This has led to the recognition of its negative consequences for both the planet and human life. The temperature difference between urban areas and adjacent rural zones is known as the Urban Heat Island (UHI) effect, a phenomenon influenced by the materials used in the construction of buildings and urban spaces. Pavements are particularly relevant in this context, as they constitute a large part of urban surfaces. Their dark color and low albedo contribute to a significant increase in surface temperature, storing a considerable amount of heat that is subsequently released into the environment. The use of cool pavements is considered a key strategy to mitigate the effects of Urban Heat Islands.

The main objective of this work is to address and solve the problem of high surface temperatures in pavements in water parks in Dubai, also serving as a guide for other users facing similar issues.

The behavior of pavements has been studied when their lower surface is wetted with water to determine the reduction in surface temperature compared to conventional materials exposed to the sun. This strategy improves thermal comfort indicators for citizens and helps mitigate the UHI effect by reducing ambient temperature in urban areas through the use of natural resources and adapting pavements to mitigation needs.

Agradecimientos	ix
Resumen	xi
Abstract	xiii
Índice	xv
Índice de Tablas	xvii
Índice de Figuras	xviii
Notación	xxi
1 Introducción	1
1.1 Marco histórico	1
1.2 Isla de Calor Urbano	2
1.3 Optimización del uso de espacios en el exterior	3
1.4 Pavimentos fríos	3
1.4.1 Concepto inicial de pavimentos fríos	3
1.4.2 Pavimentos reflectantes	3
1.4.3 Pavimentos evaporativos	4
1.4.4 Pavimentos de cambio de fase	5
1.4.5 Pavimentos de alta conductividad	5
1.4.6 Pavimentos con sistemas de circulación de fluidos	5
1.4.7 Resumen	5
1.5 Objetivos	6
2 Metodología	8
2.1 Conceptos teóricos	8
2.1.1 Transmisión de calor	8
2.1.2 Conducción en cerramientos opacos, régimen transitorio	9
2.1.3 Resolución numérica	10
3 Resultados situación de partida	13
3.1 Evaluación de la situación de partida	13
3.1.1 Límites de la temperatura de la piel	14
3.1.2 Cálculo de los límites de la temperatura de contacto	15
3.2 Análisis del clima	16
3.3 Análisis de las temperaturas superficiales de pavimentos	19
3.3.1 Situación convencional	19
4 Resultados del análisis de sensibilidad inicial	23
4.1 Análisis de propiedades	23
4.1.1 Influencia de la absortividad	23
4.1.2 Coeficiente de transferencia de calor por convección	25
4.1.3 Temperatura del agua	26
4.1.4 Influencia de las características del material	27
4.1.5 Influencia del espesor	29
4.2 Comparación condiciones secas respecto enfriamiento por agua	30
4.2.1 Evolución de la temperatura superficial con la influencia del agua	31
4.2.2 Variación de la temperatura máxima	32
4.2.3 Temperatura media del día	32
4.2.4 Sobrecalentamiento superficial	33
4.2.5 Evaluación de la efectividad de la técnica seleccionada	35
5 Conclusión	37

<i>5.1 Limitaciones del estudio</i>	37
<i>5.2 Aplicaciones futuras</i>	37
<i>5.3 Posibles líneas de investigación</i>	38
Referencias	39
Anexo A: Código de los cálculos en EES	40
Anexo B: Datos climáticos del verano en Dubái	41
Anexo C: Elección del día tipo de cada mes de verano	43
Anexo D: Simulador de casos para el análisis de sensibilidad inicial	46

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 4–10: Propiedades térmicas de la piel y el hormigón	16
Tabla 4–11: Resultados TA	16
Tabla 3–1. Selección del día tipo para cada mes de verano	17
Tabla 3–2. Para propiedades de $\alpha= 0,4$ y $e= 2,5\text{cm}$	19
Tabla 3–3. Para propiedades de $\alpha= 0,5$ y $e= 2,5\text{cm}$	19
Tabla 3–4. Para propiedades de $\alpha= 0,6$ y $e= 2,5\text{cm}$	20
Tabla 3–5. Para propiedades de $\alpha= 0,5$ y $e= 2,5\text{cm}$	21
Tabla 3–6. Para propiedades de $\alpha= 0,5$ y $e= 5\text{cm}$	21
Tabla 3–7. Para propiedades de $\alpha= 0,5$ y $e= 7\text{cm}$	21
Tabla 4–1 Propiedades fijadas variando la absortividad	24
Tabla 4–2 Propiedades fijadas variando hw	25
Tabla 4–3 Propiedades fijadas variando Tw	26
Tabla 4–4 Propiedades fijadas variando propiedades del material	28
Tabla 4–5 Variación de las propiedades del material	28
Tabla 4–6 Propiedades fijadas variando el espesor	29
Tabla 4–7: Variación de la temperatura superficial del día	32
Tabla 4–8: Temperatura media caso seco y húmedo	32
Tabla 4–9: Especificación de casos	33
Tabla 4–10 Definición de casos a estudiar	35
Tabla 4–11: % horas caso 1	35
Tabla 4–12: % horas caso 2	36

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Comparativa climática entre entornos urbanos y rurales. Fuente: (Armando Aldana Razo, 2021)	1
Figura 2: Estrategias para mejorar la calidad de Vida Urbana. Fuente: (CartujaQanat, 2023; Chuttersnap,2022)	2
Figura 3: Pavimento reflectante. Fuente:(Cristina Ávila Freire, 2018)	4
Figura 4: Pavimentos evaporativos. Fuente: (<i>Pavimento Drenante</i> , 2018)	5
Figura 5: Comparativa entre diferentes tecnologías de pavimentos frío. Fuente: Elaboración propia	6
Figura 6: Esquema de circulación del agua por debajo del pavimento. Fuente: Grupo termotecnia	7
Figura 7: Balance interno y externo de un cerramiento. Fuente: Grupo termotecnia	10
Figura 8: Balance. Fuente: Grupo termotecnia	10
Figura 9: Ecuación matricial. Fuente: Grupo termotecnia	11
Figura 10: Situación de partida. Fuente: Elaboración propia	13
Figura 11: Rango de temperaturas. Fuente: Grupo termotecnia	14
Figura 12: Definición de la temperatura de contacto. Fuente: Grupo termotecnia	15
Figura 13: Clima de Dubái en verano. Fuente: Elaboración propia	17
Figura 14: Radiación solar del 24/07/2023	18
Figura 15: Radiación solar del 14/10/2023. Fuente: Elaboración propia	18
Figura 16: Influencia de la absortividad para un espesor dado. Fuente: Elaboración propia	20
Figura 17: Influencia del espesor para una absortividad dada. Fuente: Elaboración propia	22
Figura 18: Influencia de la absortividad. Fuente: Elaboración propia	24
Figura 19: Influencia del coeficiente de película del agua. Fuente: Elaboración propia	25
Figura 20: Influencia de la temperatura del agua. Fuente: Elaboración propia	27
Figura 21: Influencia de diferentes materiales. Fuente: Elaboración propia	28
Figura 22: Influencia del espesor	29
Figura 23: Influencia en la T^a superficial al hacer pasar agua	31
Figura 24: Sobrecalentamiento en el caso 2	34
Figura 25: Sobrecalentamiento en el caso 1	34
Figura 26: Cálculo EES para $T_{skin}= 35^{\circ}C$	40
Figura 27: Cálculo EES para $T_{skin}= 43^{\circ}C$	40
Figura 28: Datos climáticos. Fuente: Grupo termotecnia	41
Figura 29: Día tipo de mayo. Fuente: Elaboración propia	43
Figura 30: Día tipo de junio. Fuente: Elaboración propia	43
Figura 31: Día tipo de julio. Fuente: Elaboración propia	44
Figura 32: Día tipo de agosto. Fuente: Elaboración propia	44
Figura 33: Día tipo de septiembre. Fuente: Elaboración propia	44
Figura 34: Día tipo de octubre. Fuente: Elaboración propia	45
Figura 35: Propiedades del material. Fuente: Grupo termotecnia	46
Figura 36: Simulador de casos. Fuente: Grupo termotecnia	47

NOTACIÓN

α	Absortividad del pavimento []
C_p	Calor específico [J/kgK]
h_w	Coefficiente de película del lado del agua en pavimento [W/ m ² K]
h_a	Coefficiente convectivo del lado del agua en pavimento [W/ m ² K]
h_c	Coefficiente de transferencia de calor por convección [W/ m ² K]
h_r	Coefficiente de transferencia de calor por radiación [W/ m ² K]
ICU	Isla de Calor Urbana
ρ	Densidad [kg/m ³]
T_{aire}	Temperatura aire exterior [°C]
T_{eq}	Temperatura equivalente [°C]
T_{sa}	Temperatura sol-aire [°C]
T_{cielo}	Temperatura de cielo [°C]
T_{skin}	Temperatura de la piel [°C]
T_s	Temperatura superficial [°C]
$T_{B,0}$	Temperatura inicial de la piel [°C]
T_A	Temperatura de contacto [°C]
T_w	Temperatura del agua [°C]
Φ	Flujo de calor [J/s] o [W]
Q	Energía calorífica o calor (J)
t	Tiempo [s]
T	Temperatura [K]
G	Generación interna de calor (W/m ³)
CD	Conducción
RD	Radiación
CV	Convección
e	Espesor (cm)
Re	Reynolds []

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Marco histórico

La problemática del cambio climático ha adquirido una relevancia sin precedentes en las últimas décadas, convirtiéndose en un tema central a nivel mundial. El aumento de la temperatura promedio en la superficie del planeta, el deshielo de grandes cantidades de agua congelada, los fenómenos climáticos extremos y otros impactos asociados al cambio climático son evidencia de la urgencia de abordar esta cuestión que no sólo afecta al medio ambiente, sino también al resto de seres vivos. Es por ello, que se contemplan consecuencias negativas en el planeta y en la vida humana. (González Jiménez, 2020)

Hoy en día, la transformación de paisajes naturales en estructuras artificiales, debido a la urbanización masiva junto con el rápido crecimiento de la población global, ha traído como consecuencia el aumentado de la temperatura urbana. Estos fenómenos acentúan determinados problemas energéticos y medioambientales, claramente relacionados con causas antropogénicas. En consecuencia, es de suma importancia tomar conciencia y esforzarse científicamente para hacer frente a este problema.

El clima urbano se determina mediante la comparación existente entre el entorno rural. A partir de las diferencias que se encuentran entre ambos nos permite caracterizar el comportamiento del clima en las ciudades. Las diferencias que se aprecian suelen ser:

- Aumento de las temperaturas mínimas, penalizando el enfriamiento nocturno
- Se reduce la diferencia entre los valores máximos y mínimos de temperatura
- Variación de los vientos debido a la presencia de edificios y calentamiento de las superficies por radiación
- Reducción de las superficies vegetales que permiten la evapotranspiración

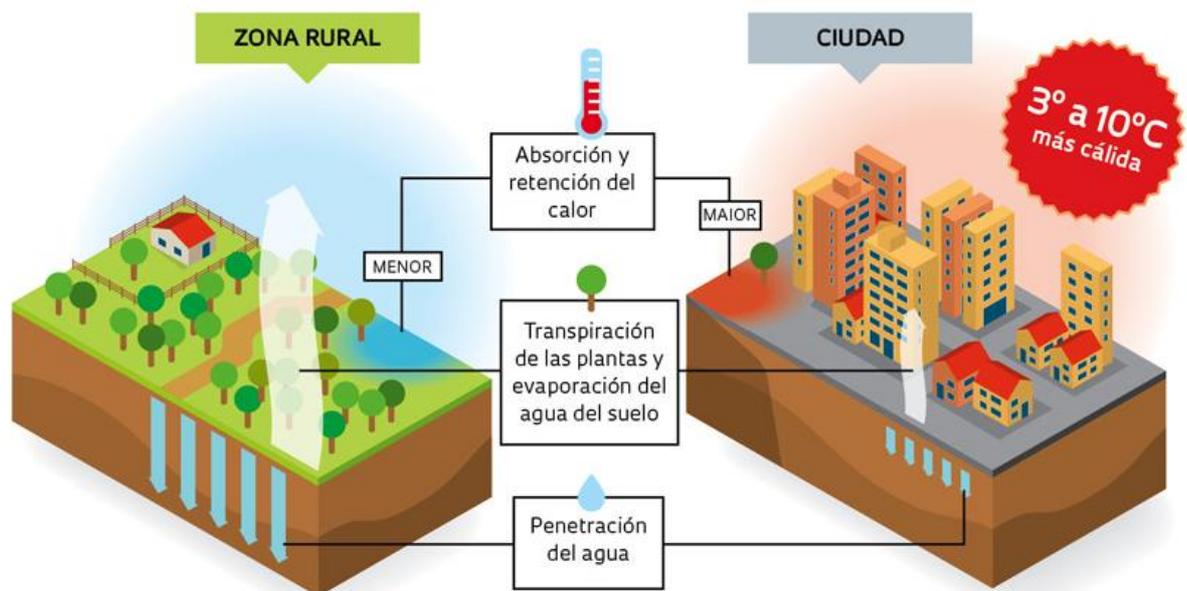


Figura 1: Comparativa climática entre entornos urbanos y rurales. Fuente: (Armando Aldana Razo, 2021)

1.2 Isla de Calor Urbano

Dicho aumento de la temperatura urbana provoca el efecto de Isla de Calor Urbana (ICU). Fenómeno que se da lugar en zonas urbanas que experimentan temperaturas más altas que las zonas circundantes debido a la actividad humana. (David Plata Martín, 2020)

Las principales causas que contribuyen a la generación de las islas de calor urbano son:

- Las superficies oscuras y con alta conductividad térmica, como lo son las aceras y los asfaltos, que absorben más calor de la radiación y lo liberan más lentamente.
- Escasez de áreas verdes, que imposibilita una bajada de temperatura por la evaporación del agua de las plantas. Además, el suelo de las ciudades se encuentra a una mayor temperatura motivado por la falta de árboles que proporcionan sombra.
- Acumulación de estructuras, como edificios, obstaculizando el paso del viento, impidiendo que las ciudades se refresquen por las corrientes.
- Contaminación atmosférica, que atrapa la radiación solar evitando que se disipe el calor, lo que a su vez incrementa la temperatura del aire.

Todo esto acrecenta los efectos del cambio climático en ciudades y disminuye la calidad de vida de sus habitantes.

Las elevadas temperaturas urbanas tienen grandes repercusiones en la vida de la ciudad, particularmente en el consumo de energía para refrigerar, incrementando la demanda de energía, impacto sobre la salud, que provoca malestar general, cansancio, problemas respiratorios, deshidratación, entre otras. (*Emerging Technologies in Cool Pavements: A Review*, 2021) En ciudades que tengan una media de un millón de habitantes o más, la temperatura promedio del aire puede variar entre 1°C y 3°C más durante el día en comparación con su área circundante, mientras que por la noche puede aumentar drásticamente, llegando incluso a 10°C más.

En los últimos años, la investigación de medidas innovadoras para minimizar y hacer frente a los impactos de las islas de calor urbanas se centra principalmente en: (David Plata Martín, 2020)

- Arquitectura bioclimática, diseñando edificaciones que aprovechan los recursos naturales para reducir su impacto ambiental y mejorar la eficiencia energética. Esto incluye, considerar la orientación de las construcciones, uso de materiales sostenibles, aprovechamiento de la luz natural y la ventilación pasiva para optimizar el confort térmico.
- Infraestructuras sostenibles, esto implica utilizar materiales y tecnologías sostenibles, renovando edificios, carreteras, aceras.
- Incorporación de zonas verdes, permitiendo conectar áreas naturales de la ciudad con amplias áreas de vegetación. Esto puede incluir parques, techos verdes, paredes vegetales. Estas áreas proporcionan múltiples beneficios, como mejorar la calidad del aire, reducir las temperaturas y mejorar la salud mental y física de los residentes urbanos



Figura 2: Estrategias para mejorar la calidad de Vida Urbana. Fuente: (CartujaQanat, 2023; Chuttersnap,2022)

1.3 Optimización del uso de espacios en el exterior

Uno de los principales desafíos es diseñar espacios al aire libre que sean confortables y atractivos con el objetivo de mejorar la calidad de vida y disminuir los impactos negativos de la urbanización.

El aumento de las temperaturas puede generar malestar tanto en espacios interiores como exteriores. Ambientes excesivamente calurosos pueden desalentar a los usuarios, quienes buscarán refugio en interiores con sistemas de refrigeración para el ocio y el descanso.

Que las calles y plazas se encuentren vacías desencadenan problemas para la calidad de vida urbana y la economía local. Por lo tanto, es crucial diseñar espacios exteriores acogedores con la combinación adecuada de sombra, sol, ventilación y temperatura confortable para atraer a los usuarios de nuevo. (Irina Tumini, 2012)

Además, estudios han demostrado que las personas utilizan los espacios al aire libre debido al estímulo climático, escapando así de la sensación térmica constante mantenida en los edificios por los sistemas de climatización. La variabilidad climática en el exterior ofrece la oportunidad de estar en contacto con la naturaleza, el paso del tiempo y los cambios estacionales.

1.4 Pavimentos fríos

Muchos estudios han demostrado que los pavimentos desempeñan un papel significativo en el desarrollo de las Islas de Calor Urbanas, dado que las aceras representan una fracción importante de las áreas urbanas, el uso de pavimentos fríos se considera una estrategia importante para reducir los efectos de las Islas de Calor Urbano. Los resultados muestran que el rendimiento de refrigeración de los pavimentos fríos puede ayudar a reducir la temperatura en entornos urbanos. (Paulo Javier García Melgar, 2024)

1.4.1 Concepto inicial de pavimentos fríos

Los pavimentos fríos son superficies que tienden a tener temperaturas más bajas que el entorno circundante. Esto puede ser debido a varios factores como la reflectividad, que determina la capacidad de una superficie para reflejar una gran la radiación solar incidente, oscilando su valor entre 0 y 1. Donde tomar valores cercanos a 1 significa que refleja una gran mayoría de la radiación incidente. Este factor refleja la capacidad de un material para difundir energía. La parte de la energía que no se refleja aumenta la temperatura de la superficie. (Seifeddine et al., 2023)

1.4.2 Pavimentos reflectantes

Varios estudios en la literatura han investigado la reflectividad del pavimento y su influencia en la temperatura de la superficie y la transferencia de calor. Los pavimentos reflectantes están fuertemente influenciado por el color y la rugosidad de la superficie. (Seifeddine et al., 2023)

Existen técnicas para aumentar la reflectividad del hormigón, como mezclar hormigón con materiales cementosos blanquecinos y áridos de colores claros. El cemento es el componente que conforma el hormigón más importante para determinar la reflectancia del mismo.

Aumentar la emisividad de un pavimento puede tener un efecto significativo en la temperatura de su superficie. La emisividad es una medida de capacidad del material para emitir energía en forma de radiación térmica. Los materiales con mayor emisividad emiten más energía en forma de radiación térmica y por lo tanto tienden a tener temperaturas superficiales más bajas que los materiales con menor emisividad, por lo que el aumento de la emisividad de la superficie puede disminuir simultáneamente las temperaturas máxima y mínima en aproximadamente 4°C o 7°C.

Las limitaciones que nos encontramos en los pavimentos reflectantes es que en los pavimentos de hormigón convencionales a base de cemento tienen una reflectividad entre 0,35 y 0,4, pero a medida que el hormigón envejece, se vuelve progresivamente más oscuro debido a la suciedad o desgaste, por lo que la limpieza y el mantenimiento periódico son esenciales para garantizar un rendimiento óptimo. Otras limitaciones que presentan es que su eficacia es limitada ya que estos pavimentos sólo reducen el efecto isla de calor urbana durante el día,

por la noche no proporciona beneficios refrescantes. En cuanto al coste, suelen ser más caros que los tradicionales. También pueden crear problemas de seguridad, debido a la alta reflectividad pudiendo provocar deslumbramientos especialmente en días soleados.

Es importante señalar que la eficacia de los pavimentos reflectantes puede variar según el clima, la ubicación geográfica y las condiciones locales.

Los pavimentos retrorreflectantes se han desarrollado como una solución para algunas de las limitaciones de los pavimentos reflectantes convencionales. Se proponen materiales retrorreflectantes, Ya que, al reflejar la luz solar de vuelta hacia su fuente original, pueden disminuir la cantidad de energía solar absorbida por la superficie del pavimento. Además, mejoran la visibilidad nocturna al reflejar la fuente de luz tanto como sea posible.



Figura 3: Pavimento reflectante. Fuente:(Cristina Ávila Freire, 2018)

1.4.3 Pavimentos evaporativos

El enfriamiento evaporativo podría reducir tanto la temperatura del pavimento como la temperatura del aire debido al calor latente absorbido para cambiar la fase del agua de líquido a gas. Por lo tanto, esta estrategia requiere la presencia de agua en la estructura del pavimento o en el suelo subyacente. (Seifeddine et al., 2023)

El uso de este tipo de pavimento es especialmente adecuado en países con elevadas precipitaciones estivales. En caso contrario, habrá que regar artificialmente las aceras. Este tipo de pavimentos generalmente son permeables. Existen varios tipos de pavimentos permeables evaporativos: adoquines porosos, adoquines impermeables con juntas permeables, pavimentos permeables y pavimentos retenedores de agua.

Algunos ejemplos de pavimento evaporativos son:

- Adoquines con vegetación porosa: tiene formas alveolares que permiten la vegetación del suelo y aseguran la infiltración del agua.
- Adoquines impermeables con juntas permeables: Se colocando adoquines impermeables uno contra otro, lo que permite que el agua no pase directamente a través del pavimento hasta la base, pero permite que el agua se filtre a través de las juntas permeables. Estas juntas, proporcionan un canal para la evaporación del agua almacenada en la capa superficial.
- Pavimentos permeables: Permiten que el agua pase directamente a través de sus estructuras debido a una red interconectada de poros.

Cualquier tecnología, tiene limitaciones. Esto incluye la disponibilidad de agua, ya que estos pavimentos requieren una cantidad significativa de agua para mantener su efecto de enfriamiento. La durabilidad, que puede reducir su eficiencia y aumentar los costos de mantenimiento, entre otros.



Figura 4: Pavimentos evaporativos. Fuente: (*Pavimento Drenante*, 2018)

1.4.4 Pavimentos de cambio de fase

Los materiales de cambio de fase son materiales capaces de cambiar su estado físico dentro de un rango de temperatura restringido. El cambio de fase más frecuente es la fusión/solidificación. Estos materiales tienen la capacidad de almacenar calor absorbiéndolo o liberar calor y controlar la temperatura. (Seifeddine et al., 2023)

A medida que aumenta la temperatura ambiente, el pavimento de cambio de fase absorbe calor de la superficie del pavimento y del aire circundante, lo que hace que el material cambie de fase de sólido a líquido. Esta absorción de calor mantiene fresca la superficie del pavimento al reducir la cantidad de calor transmitido al pavimento debajo. Una vez que la temperatura ambiente disminuye, libera el calor almacenado y sufre un cambio de fase de líquido a sólido, lo que permite que la superficie del pavimento permanezca fresca incluso en climas cálidos.

Uno de los principales desafíos que presenta son la gestión de la expansión y contracción durante el cambio de fase, la durabilidad a largo plazo y la integración adecuada con el entorno para maximizar su eficacia energética. Además, el costo inicial puede ser un factor limitante para su adopción generalizada.

1.4.5 Pavimentos de alta conductividad

Cuando la conductividad térmica del pavimento aumenta, contribuye a una transferencia de calor más rápida desde la superficie al interior del pavimento y viceversa. De hecho, durante el día, cuando la temperatura del pavimento es superior a la del suelo, se produce una transferencia de calor al suelo, lo que disminuye la temperatura de su superficie. Durante la noche se observa el fenómeno contrario. Aunque el aumento de la temperatura de la superficie del pavimento durante la noche es insignificante en comparación con los beneficios que proporciona durante el día. (Seifeddine et al., 2023)

No se recomienda pavimentos con alta conductividad térmica para regiones con temperaturas nocturnas relativamente altas.

Es posible aumentar la conductividad térmica de los pavimentos agregando productos de alta conductividad térmica, como acero y fibras de carbono, grafito, y añadiendo varillas metálicas de alta conductividad térmica.

1.4.6 Pavimentos con sistemas de circulación de fluidos

Consiste en hacer circular un fluido por los tubos, dicho fluido absorbe la energía transferida al pavimento por la radiación solar, lo que aumenta la temperatura del fluido en los tubos.

Con este sistema se ha demostrado que, al inyectar agua durante el verano, puede disminuir la temperatura de la superficie entre unos 10-20°C. (Seifeddine et al., 2023)

1.4.7 Resumen

Tras presentar de forma sintética varios tipos de pavimento fríos. A modo de resumen se recopilan las

características principales de los mismos. Cada técnica tiene como objetivo reducir la temperatura de las islas de calor urbana. (Anupam et al., 2021)

Tecnología	Reducción de la T ^{sup}	Ventajas	Limitaciones	Aumento de sus propiedades	Solución
Pavimento Reflectante	4-7°C	- Al reflejar gran parte de la radiación solar, la superficie del pavimento se consigue mantener más fresca	- Al envejecer el hormigón refleja menos y por tanto, absorbe más calor y hace aumentar la T ^{sup} ¹ . Eficacia limitada, reduce las T ^{sup} sólo por el día ² . Coste elevado ³ . Puede provocar deslumbramientos	- Mezclar hormigón con materiales cementosos blanquecinos	- Pavimentos retrorreflectantes
Pavimento evaporativo	15,3°C	- Sencillo y económico ¹ . Altamente efectivo en climas cálidos y secos	- Adecuado para países con elevadas precipitaciones ¹ . Disponer de agua ² . Elevados costos de mantenimiento	- Utilizar materiales porosos ¹ . Agregar aditivos ² . Diseñar un sistema de riego integrado	- Regar artificialmente las aceras
Pavimento de cambio de fase	4,3°C	¹ . Almacenamiento y liberación de grandes cantidades de energía térmica	- Gestión de la expansión y contracción ¹ . Durabilidad a largo plazo ² . Elevado costo inicial	- Utilizar materiales con alta capacidad de almacenamiento de calor	-
Pavimento de alta conductividad	3°C	- Mejora la transferencia de calor fuera del pavimento ¹ . Puede ser combinado con otras tecnologías	- No recomendado para regiones con T ^{sup} nocturnas altas	- Agregar productos de alta conductividad como el acero, fibras de carbono, grafito, varillas metálicas	-
Pavimento con sistema de circulación de fluidos	10-20°C	- Proporciona un enfriamiento constante y controlado	- Costo inicial elevado ¹ . Mantenimiento regular ² . Limitación de diseño y ubicación	- Selección de fluidos adecuados	- Desarrollo de materiales y tecnologías avanzadas

Figura 5: Comparativa entre diferentes tecnologías de pavimentos frío. Fuente: Elaboración propia

De esta revisión se pueden derivar las siguientes conclusiones a modo de resumen:

El uso de pavimentos reflectantes resulta una estrategia eficaz para mitigar las islas de calor urbanas y optimizar el microclima. Para incrementar la reflectividad de los pavimentos tradicionales, se pueden aplicar revestimientos reflectantes de colores claros o materiales retrorreflectantes.

Además, los pavimentos evaporativos son capaces de reducir la temperatura de la superficie tanto por el día como en la noche. Factores clave como la disponibilidad de agua cerca de la superficie, el coeficiente de absorción de agua y la capacidad de retención de agua influyen significativamente en el rendimiento del enfriamiento evaporativo de estos pavimentos. Por lo tanto, la disponibilidad de agua es una condición esencial para el comportamiento térmico de los pavimentos evaporativos.

Asimismo, los pavimentos que incorporan materiales de cambio de fase y aquellos que captan energía tienen el potencial de mejorar significativamente el microclima urbano.

Por último, se ha demostrado que al aumentar la conductividad térmica de las aceras puede garantizar temperaturas más bajas durante el día, esto resulta en temperaturas más altas durante la noche debido a la liberación de calor almacenado por difusión, lo que puede empeorar el problema de las islas de calor urbanas nocturnas.

1.5 Objetivos

El principal objetivo de este trabajo es abordar y resolver el problema de las altas temperaturas en las superficies de los pavimentos en parques acuáticos de Dubái, sirviendo además como guía para que otros usuarios puedan enfrentar problemas similares. Este proyecto pretende ser una base para futuros desarrollos en pavimentos fríos y la implementación de nuevas tecnologías, evaluando la efectividad de estas soluciones para mitigar el efecto de la Isla de Calor Urbana.

Se selecciona Dubái como caso de estudio debido a su rápido crecimiento económico y las extremas temperaturas que enfrenta durante gran parte del año, superando regularmente los 40°C en verano. La

combinación de calor intenso y alta humedad durante los meses de verano puede hacer que las condiciones sean desafiantes para los residentes y visitantes. Por esta razón, la ciudad está comprometida con la implementación de medidas para mitigar el calor, permitiendo a estos seguir disfrutando de las numerosas atracciones y actividades que ofrece Dubái incluso durante los meses más cálidos del año.

En el presente proyecto, se han presentado diversas tecnologías de pavimentos fríos para reducir las temperaturas superficiales de los pavimentos, logrando así una disminución del efecto de isla de calor urbana. Se seleccionó la técnica que inicialmente parecía más viable y rentable, procediendo a un análisis exhaustivo para verificar su efectividad en la reducción de la temperatura superficial y determinar si resolvería el problema planteado.

Para ello, se propone:

- Estudiar la temperatura superficial de los pavimentos convencionales en Dubái durante el verano, para identificar oportunidades de mejora
- Se definieron los límites de la temperatura de contacto, estableciendo rangos claros de dolor por quemadura o sensación de calor tolerable para la piel humana.
- Evaluar la viabilidad de distintas técnicas como el uso de pavimentos reflectantes, colores claros, hormigones con alta reflectividad, pavimentos fríos, sistemas de enfriamiento en áreas críticas y la colocación estratégica de sombras y vegetación.
- Se analizará la influencia del agua en la temperatura superficial del pavimento variando factores como la absorptividad, el coeficiente de transferencia del agua, la temperatura del agua, propiedades del material y el espesor del pavimento.

El trabajo se organizará de la siguiente manera:

En la Sección 2 se presentarán los fundamentos teóricos necesarios para el estudio, incluyendo el fenómeno de la conducción en cerramientos y la transmisión de calor. En la Sección 3 se expondrá el caso de estudio de Dubái, analizando la situación actual de los pavimentos y las condiciones climáticas extremas de la ciudad. La Sección 4 se dedicará a un análisis de sensibilidad para evaluar los efectos de la tecnología seleccionada en la resolución del problema planteado, considerando diferentes escenarios y variables. Finalmente, en la Sección 5 se presentarán las principales conclusiones del estudio, destacando las soluciones más viables y las recomendaciones para futuras investigaciones y desarrollos en el campo de los pavimentos fríos.

Una de las propuestas tecnológicas clave es la implementación de pavimentos fríos, utilizando agua fría circulando por debajo del pavimento mediante cavidades para reducir la temperatura superficial. Así, mediante el fenómeno de conducción, el pavimento se enfría mientras que, al no migrar a la superficie y no existir evaporación, el consumo de agua se reduce drásticamente. Como se puede comprobar en la Figura 6. (Paulo Javier García Melgar, 2024)

Esta técnica ha demostrado ser efectiva en experimentos previos, capaces de reducir la temperatura superficial entre 10°C y 20°C. El agua provendría de pozos profundos y se utilizaría de manera sostenible, recolectando agua de lluvia en temporadas húmedas para su uso durante las épocas de calor.

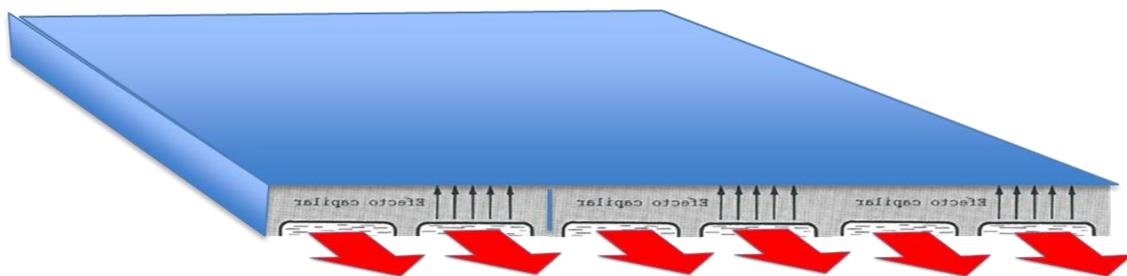


Figura 6: Esquema de circulación del agua por debajo del pavimento. Fuente: Grupo termotecnia

En este contexto, se analizará la influencia del agua en la temperatura superficial del pavimento para seleccionar si dicha tecnología novedosa lograría la solución al problema planteado.

2 METODOLOGÍA

2.1 Conceptos teóricos

En esta sección, se abordarán los conceptos teóricos fundamentales necesarios para comprender y llevar a cabo el estudio. Se explorarán los principios básicos de la transmisión de calor, cruciales para analizar cómo se comportan los pavimentos bajo condiciones de calor extremo, como las que se presentan en Dubái. Además, se detallará el fenómeno de la conducción en cerramientos opacos y cómo varía en régimen transitorio, proporcionando un marco teórico sólido para evaluar las técnicas de mitigación del calor propuestas. También se incluirá una introducción a la resolución numérica, destacando el modelado y análisis computacional necesarios para este estudio.

2.1.1 Transmisión de calor

Al poner en contacto dos cuerpos a distinta temperatura, se produce una transmisión de calor desde el cuerpo que se encuentra a mayor temperatura hacia el cuerpo de temperatura menor, hasta que las temperaturas de ambos se igualan alcanzándose el equilibrio térmico.

El calor transmitido de un cuerpo a otro (flujo de calor) varía en el tiempo según van cambiando las temperaturas de los dos cuerpos en contacto. Por eso, el flujo de calor se define como la cantidad de calor transmitida hacia o desde un sistema por unidad de tiempo. (Roberto Rodríguez Álvaro, 2016)

$$\phi = \frac{\partial Q}{\partial t} \quad (2-1)$$

Donde:

Φ : Flujo de calor [J/s] o [W]

Q : Energía calorífica o calor [J]

t : Tiempo [s]

A la hora de afrontar el estudio de un proceso de transmisión de calor hay que tener en cuenta los conceptos de régimen transitorio y de régimen estacionario.

Como se ha comentado anteriormente, la transmisión de calor depende de la diferencia de temperatura entre dos cuerpos. Esto significa que el calor siempre fluye del cuerpo más caliente al cuerpo más frío. A medida que el cuerpo más frío se calienta, la diferencia de temperatura entre los dos cuerpos disminuye. Esta reducción en la diferencia de temperatura hace que la velocidad de transferencia de calor también disminuya. Es por ello que debido a que la velocidad de transferencia de calor no es constante y cambia a medida que varían las temperaturas de los cuerpos, evaluar y calcular el proceso de transferencia de calor se vuelve más complicado.

Para simplificar el proceso y hacerlo más fácil de abordar, se ha creado lo que se llama régimen permanente o estacionario de temperaturas. Este régimen considera que los sistemas funcionan de manera constante, sin que las condiciones cambien con el tiempo, manteniendo las condiciones de trabajo estables durante un tiempo indefinido.

Sin embargo, el régimen transitorio es el estado térmico que no sólo depende de la temperatura de los sistemas que intercambian energía, sino también del tiempo. Este fenómeno es especialmente notable en verano, ya que a las condiciones de elevada temperatura exterior hay que sumar un incremento provocado por la radiación solar al incidir sobre las superficies que, una vez absorbida, se convierte en un incremento de temperatura. El resultado es una temperatura ficticia denominada sol-aire, que puede ser entre 10 y 20°C superior a la temperatura real del ambiente exterior. Esta temperatura elevada se mantiene mientras el sol

sigue incidiendo sobre la superficie, pero disminuye rápidamente una vez que la radiación solar deja de impactarla.

Esta notable variación de las temperaturas exteriores a la hora de evaluar la transmisión de calor a través de un cerramiento, obliga a incorporar conceptos de régimen variable en su cálculo si se desea obtener resultados muy próximos a la realidad.

2.1.2 Conducción en cerramientos opacos, régimen transitorio

La conducción es el método predominante de transmisión de calor entre sólidos. Este proceso requiere que haya contacto directo entre ellos y no implica transporte de masa. La eficiencia de la conducción depende de las propiedades del material, como su conductividad térmica, densidad y capacidad calorífica específica.

Para el estudio del comportamiento de cerramientos opacos ante diferentes condiciones de contorno, partimos de la ecuación general de conducción de calor con generación que describe cómo se transfiere el calor dentro de un medio sólido y cómo se genera calor dentro de ese medio.

Esta ecuación considera tanto los cambios de temperatura con el tiempo como la distribución espacial de la temperatura, incluyendo cualquier generación interna de calor. En situaciones prácticas, esta ecuación nos permite analizar cómo un cerramiento opaco, como un pavimento, responde a variaciones en la temperatura exterior, la radiación solar y otras fuentes de calor, proporcionando una base para diseñar cerramientos eficientes que contribuyan al confort térmico.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + G = \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2-2)$$

Donde:

T es la temperatura [K]

t es el tiempo [s]

k es la conductividad térmica del material [W/m·K]

ρ es la densidad del material [kg/m³]

C_p es la capacidad calorífica específica a presión constante [J/kg·K]

G generación interna de calor [W/m³]

Tras partir del caso más general, particularizamos para el caso unidireccional, donde la conducción de calor ocurre en una sola dirección, sin generación, puesto que tomaremos que no hay fuentes internas de generación de calor, teniendo en cuenta solo una capa homogénea y de propiedades constantes, que es lo que tomaremos como referencia. La ecuación que se muestra a continuación quedará definida por unas condiciones de contorno internas y externas.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) = \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2-3)$$

Las condiciones de contorno necesarias para definir el problema se obtienen haciendo balance en las superficies internas y externas donde:

$$\text{CONDUCCIÓN} = \text{CONVECCIÓN} + \text{INTERCAMBIO RADIANTE} \quad (2-4)$$

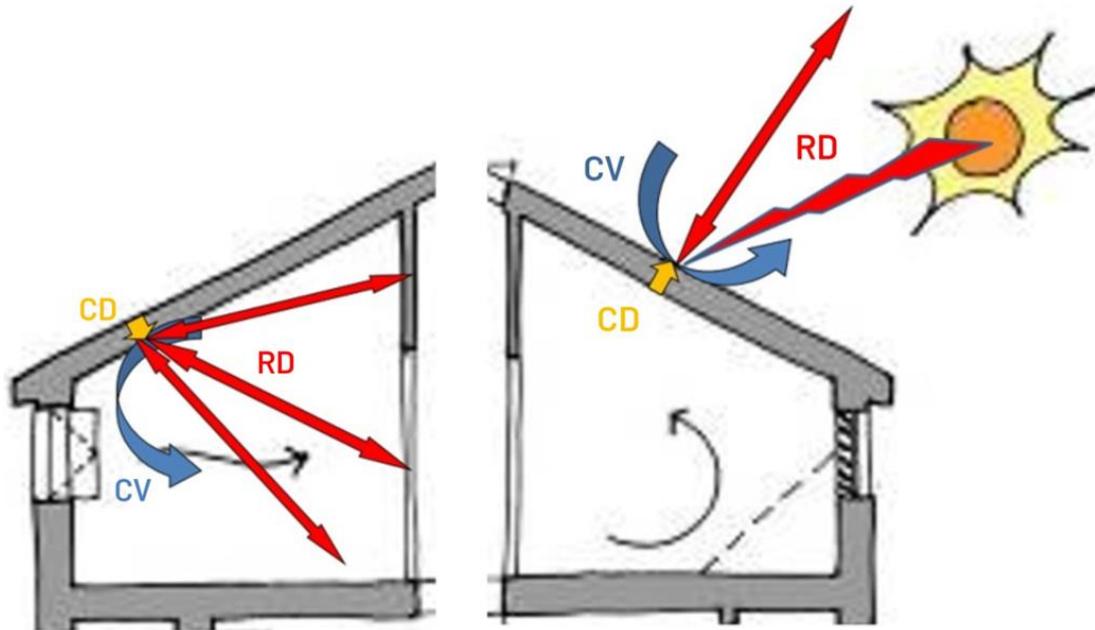


Figura 7: Balance interno y externo de un cerramiento. Fuente: Grupo termotecnia

2.1.3 Resolución numérica

Para su resolución establecemos un modelado numérico, discretizando el dominio con una malla suficientemente pequeña como para que en cada celda se pueda suponer temperaturas uniformes y poder conseguir las incógnitas, es este caso, la temperatura de la superficie externa e interna del pavimento en unas determinadas condiciones.

A continuación, se muestra un modelo de circuito térmico donde para cada nodo se plantea un balance incremental, utilizando analogía eléctrica, quedando del siguiente modo:

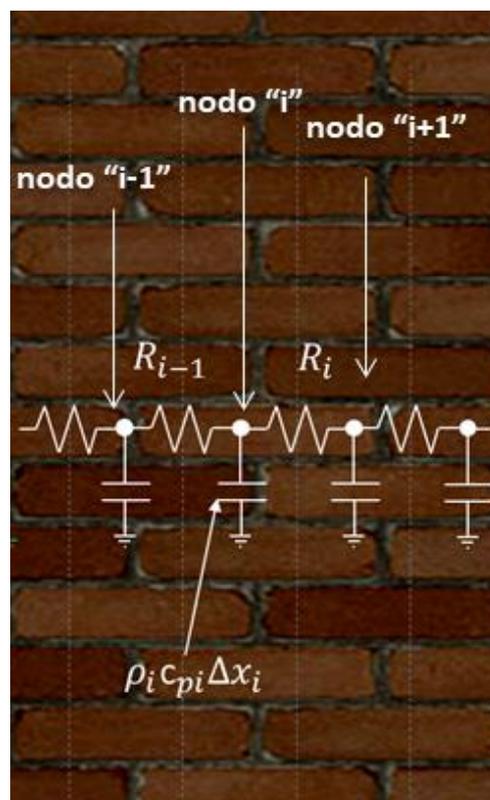


Figura 8: Balance. Fuente: Grupo termotecnia

Estos nodos representan puntos específicos a lo largo del pavimento en la dirección en que fluye el calor. Las resistencias térmicas entre los nodos reflejan la oposición al flujo de calor y dependen de las propiedades del material, como la conductividad térmica, y de la distancia entre los nodos. Por otro lado, las capacidades térmicas de los nodos representan la cantidad de energía térmica que el material puede almacenar, determinada por la densidad del material, su capacidad calorífica específica y el volumen del segmento entre nodos. Este modelo permite analizar cómo se distribuye y almacena el calor dentro del pavimento.

$$\rho C_p \Delta x_i \left(\frac{\partial T_i}{\partial t} \right) = \left(\frac{T_{i+1} - T_i}{R_i} + \frac{T_{i-1} - T_i}{R_{i-1}} \right) \quad (2-5)$$

Para resolver problemas de conducción de calor en una dimensión, el término de la derivada con respecto al tiempo se puede discretizarse utilizando métodos explícitos o implícitos. Ambas alternativas tienen sus propias ventajas y desventajas en términos de estabilidad, precisión y complejidad.

En el método explícito, presenta ventajas como su facilidad de implementación y que es computacionalmente eficiente ya que cada paso de tiempo se calcula directamente. Sin embargo, la precisión puede ser limitada debido al pequeño paso de tiempo requerido.

$$\rho C_p \Delta x_i \left(\frac{T_{i,j} - T_{i,j-1}}{\Delta t} \right) = \left(\frac{T_{i+1,j-1} - T_{i,j-1}}{R_i} + \frac{T_{i-1,j-1} - T_{i,j-1}}{R_{i-1}} \right) \quad (2-6)$$

La forma implícita es incondicionalmente estable, lo que significa que puede utilizar pasos de tiempo más grandes sin volverse inestable y puede ser más preciso a largo plazo debido a la posibilidad de usar mayores pasos de tiempo. Pero requiere resolver un sistema de ecuaciones lineales en cada paso de tiempo, lo que puede ser muy costoso y complejo implementar.

$$\rho C_p \Delta x_i \left(\frac{T_{i,j} - T_{i,j-1}}{\Delta t} \right) = \left(\frac{T_{i+1,j} - T_{i,j}}{R_i} + \frac{T_{i-1,j} - T_{i,j}}{R_{i-1}} \right) \quad (2-7)$$

En este caso, emplearemos el método implícito ya que nos proporcionará resultados más fiables y estables.

La ecuación matricial resultante para el método implícito es la siguiente:

$$[MA] \cdot [T] = [VB] \quad (2-8)$$

$$\begin{bmatrix} 1 + \frac{\rho_e \cdot c_e \cdot \Delta x^2}{2 \cdot k_e \cdot \Delta t} + \frac{h_e \cdot \Delta x}{k_e} & -1 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ -k(i) & \frac{C_i \cdot \rho_i \cdot \Delta x^2 + (k_{i+1} + k_i) \cdot \Delta t}{\Delta t} & -k(i+1) & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & -k(i) & \frac{C_i \cdot \rho_i \cdot \Delta x^2 + (k_{i+1} + k_i) \cdot \Delta t}{\Delta t} & -k(i+1) & \dots & 0 & \vdots \\ 0 & 0 & -k(i) & \backslash & \dots & -k(i+1) & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & 0 & -k(i) & \frac{C_i \cdot \rho_i \cdot \Delta x^2 + (k_{i+1} + k_i) \cdot \Delta t}{\Delta t} & -k(i+1) \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & -1 & 1 + \frac{\rho_i \cdot c_i \cdot \Delta x^2}{2 \cdot k_i \cdot \Delta t} + \frac{h_i \cdot \Delta x}{k_i} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} T_{i,j} \\ T_{i+1,j} \\ T_{i+2,j} \\ T_{i+3,j} \\ \vdots \\ T_{n,j} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{ext} \cdot \frac{h_e \cdot \Delta x}{k_e} + \frac{T_{i,j-1} \cdot \rho_e \cdot c_e \cdot \Delta x^2}{2 \cdot k_e \cdot \Delta t} \\ \vdots \\ \frac{T_{i,j-1} \cdot \rho_i \cdot c_i \cdot \Delta x^2}{\Delta t} \\ \vdots \\ T_{int} \cdot \frac{h_i \cdot \Delta x}{k_i} + \frac{T_{i,j-1} \cdot \rho_i \cdot c_i \cdot \Delta x^2}{2 \cdot k_i \cdot \Delta t} \end{bmatrix}$$

Figura 9: Ecuación matricial. Fuente: Grupo termotecnia

Donde las incógnitas son las temperaturas en cada nodo para cada instante de tiempo.

En esta sección, se ha presentado la metodología para la resolución numérica del problema de conducción de calor en pavimentos. Se ha descrito cómo discretizar el dominio utilizando una malla fina, lo que permite asumir temperaturas uniformes en cada celda y calcular con precisión las temperaturas en la superficie externa e interna del pavimento bajo determinadas condiciones. Utilizando un modelo de circuito térmico, se establecen balances incrementales en cada nodo, representando puntos específicos a lo largo del pavimento.

Las resistencias térmicas y las capacidades térmicas entre nodos se han definido en función de las propiedades del material y las distancias entre los nodos, lo que permite analizar la distribución y el almacenamiento de calor en el pavimento. Se han discutido dos métodos de discretización: el explícito y el implícito.

Para este estudio, se ha optado por el método implícito debido a su fiabilidad y estabilidad, lo que asegura obtener resultados más precisos y consistentes. La ecuación matricial resultante del método implícito proporciona las temperaturas en cada nodo para cada instante de tiempo, permitiendo un análisis detallado y preciso del comportamiento térmico del pavimento.

3 RESULTADOS SITUACIÓN DE PARTIDA

3.1. Evaluación de la situación de partida

Para comprender plenamente la problemática planteada, realizamos un análisis exhaustivo que abarca tres escenarios distintos:

Escenario Crítico: En primer lugar, se calcula la temperatura superficial del pavimento (temperatura medida en la superficie exterior de un material) bajo la condición más crítica. En esta situación, el pavimento es de color oscuro, lo que implica una alta absorptividad, cercana a 0,8. Este valor elevado de absorptividad se traduce en una mayor cantidad de energía solar absorbida, resultando en temperaturas superficiales significativamente más altas.

Escenario Intermedio: A continuación, se considera una situación en la que el pavimento es de color claro, con una absorptividad de aproximadamente 0,4. Este escenario representa una condición intermedia, donde el pavimento refleja una parte considerable de la radiación solar, reduciendo la cantidad de energía absorbida y, por ende, moderando las temperaturas superficiales en comparación con el escenario crítico.

Escenario Óptimo: Finalmente, se evalúa la situación más favorable posible, donde el pavimento es de color claro y además cuenta con una cobertura que minimiza aún más la absorción solar, estimándose una absorptividad de tan solo 0,08. Este escenario ideal maximiza la reflexión de la radiación solar, manteniendo la temperatura superficial del pavimento en niveles significativamente más bajos que en los otros dos escenarios.

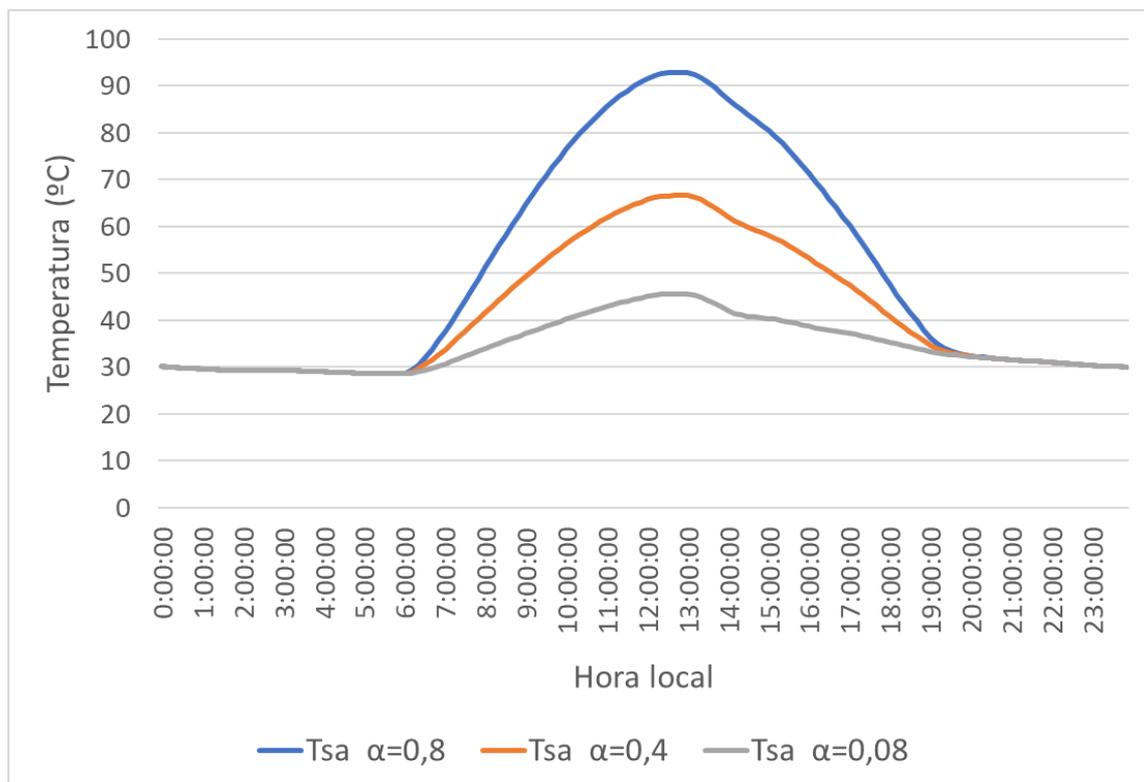


Figura 10: Situación de partida. Fuente: Elaboración propia

Para llevar a cabo el análisis se ha escogido el día 22 de julio de 2023 donde fue el día más caluroso. Se observa que para las tres situaciones definidas se llegan a alcanzar temperaturas superficiales superiores a los 40°C. Es por ello que se plantea un problema importante y real para el que se requiere una solución diferente que garantice una temperatura superficial que se encuentre dentro de los rangos para que no me provoquen quemaduras en los

pies.

El análisis se enfoca en determinar cómo varía la temperatura superficial del pavimento en función de su color y las propiedades de absorción de la radiación solar. Este enfoque permite entender las implicaciones térmicas de diferentes diseños y materiales de pavimentación, proporcionando una base técnica sólida para la toma de decisiones en la planificación urbana.

3.1.1 Límites de la temperatura de la piel

Definir los límites de temperatura de la piel con objetos tanto calientes como fríos es importante para prevenir el dolor y el daño en la piel.

La literatura científica identifica un primer umbral de temperatura para la piel desnuda que oscila entre 41,5°C y 45,5°C, donde se inicia la sensación de dolor para la piel. Así mismo se identifica otro umbral de temperatura llamado umbral de sensación de calor, en el que se siente caliente pero no llega a quemar que también es específico para la piel desnuda, el umbral de sensación de calor oscila entre 35°C y 37°C.

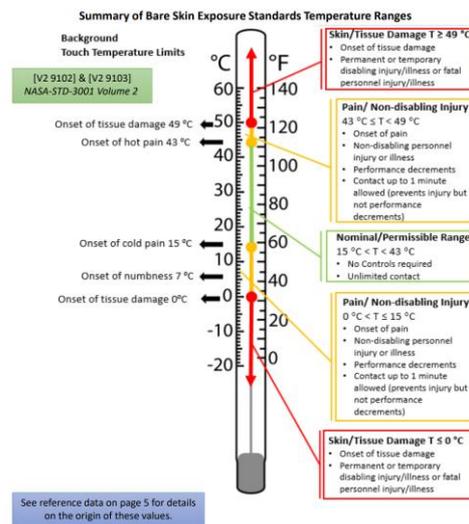


Figura 11: Rango de temperaturas. Fuente: Grupo termotecnia

Para evaluar la aceptación y comparar diferentes soluciones proponemos definir tres rangos de temperatura cutánea (T_{skin}):

- De 15°C a 35°C: Confort térmico
- De 35°C a 43°C: Sensación de calor, incómoda pero tolerable
- > 43°C: Dolor por calor

Cada solución se caracterizará en términos de confort por el porcentaje de horas que se encuentre dentro de cada uno de los tres rangos de temperatura definidos. Lo óptimo es el 100% en el rango de confort térmico. Las soluciones con un porcentaje de horas superior, digamos, al 5% en el rango de dolor por calor deben rechazarse.

Dichos rangos de temperatura cutánea están vinculados a los rangos de temperatura de contacto del material, los cuales varían según el material que se esté tocando, así como el tiempo de contacto. Como se puede observar a continuación:

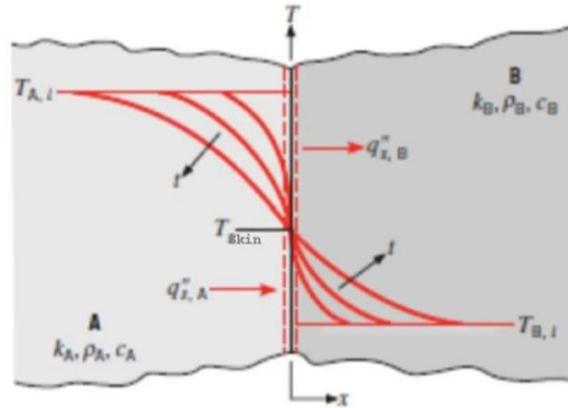


Figura 12: Definición de la temperatura de contacto. Fuente: Grupo termotecnia

La temperatura de contacto (T_A), se refiere a la temperatura en el punto donde dos superficies se tocan. Es la temperatura que experimentan las superficies en el área de contacto directo. Se puede obtener a partir de la solución de conducción transitoria de Calor en sólidos Semi-infinitos. Tiene lugar en la interfaz dérmica/epidérmica a 0,25 mm por debajo de la superficie.

Sin embargo, se puede encontrar una solución particular más simple, considerando la temperatura de contacto justo en la superficie y suponiendo que la conductancia térmica del contacto es infinita (el pie y el material del pavimento están en perfecto contacto). Esta solución es independiente del tiempo. Como se muestra en la siguiente ecuación:

$$T_{Skin} = \left(\frac{(k\rho C_p)_A^{\frac{1}{2}} T_{A,0} + (k\rho C_p)_B^{\frac{1}{2}} T_{B,0}}{(k\rho C_p)_A^{\frac{1}{2}} + (k\rho C_p)_B^{\frac{1}{2}}} \right) \quad (3-1)$$

Donde T_A representa la temperatura de contacto, la letra A corresponde al hormigón y la letra B a las propiedades de la piel. La temperatura inicial de la piel ($T_{B,0}$)

En resumen, la correcta definición y evaluación de los límites de temperatura de contacto son esenciales para garantizar la seguridad y confort de los usuarios, y constituyen un aspecto fundamental en el desarrollo de soluciones de pavimentación en climas extremos como los de Dubái.

3.1.2 Cálculo de los límites de la temperature de contacto

El propósito de este estudio es calcular los límites de la temperatura de contacto que puede alcanzar la superficie pavimentada al variar las propiedades del material, con el objetivo de determinar si se encuentran dentro del umbral de temperaturas que causan dolor por quemadura. Al examinar las propiedades térmicas del pavimento y sus efectos en la temperatura de contacto, se podrá evaluar la comodidad y seguridad para los peatones.

Para calcular los límites de la temperatura de contacto, se ha realizado una simulación a gran escala que considera todos los casos posibles, variando las características térmicas del material del pavimento. Esto nos permite obtener los límites inferiores y superiores de la temperatura de contacto. Como referencia, utilizamos los valores de la temperatura de la piel (T_{Skin}) de 35°C y 43°C, que corresponden a los dos estados principales de sensación térmica definidos con anterioridad.

Para calcular la temperatura de contacto, se ha despejado de la ecuación (3-1) dicha variable ($T_{A,0}$), y se fija la temperatura inicial de la piel ($T_{B,0}$) en 32,5°C.

Las propiedades térmicas tanto de la piel como del hormigón se exponen en la tabla que se muestra a continuación:

Tabla 3–1: Propiedades térmicas de la piel y el hormigón

	Conductividad térmica [W/mK]	Densidad [kg/m ³]	Cp [J/kgK]
Piel	0,55	0,9·10 (-3)	4,6·10 (-3)
Hormigón	2,43	2,47·10 (-3)	0,922·10 (-3)

Los cálculos de los límites de la temperatura de contacto se han realizado utilizando el programa EES (Engineering Equation Solver) que quedan adjuntos en el Anexo A.

A modo de resumen, se recopilan en la siguiente tabla los resultados obtenidos para cuatro materiales con diferentes propiedades térmicas:

Tabla 3–2: Resultados TA

Materiales	Propiedades	TA para T _{skin} =35°C	TA para T _{skin} =43°C
Material 1	k=1,4 ro=1800 Cp=940	37,45	53,29
Material 2	k=1,5 ro=1950 Cp=900	37,33	52,77
Material 3	k=1,6 ro=2100 Cp=850	37,23	52,38
Material 4	k=1,7 ro=1950 Cp=800	37,16	52,06

De los resultados obtenidos, se puede concluir que la temperatura de contacto no debe superar aproximadamente los 52°C para evitar que la temperatura de la piel exceda los 43°C, lo cual provocaría una sensación térmica de dolor por quemadura. En cambio, para mantener una temperatura de la piel de 35°C, que corresponde a una sensación de calor incómoda pero tolerable, la temperatura de contacto debe estar comprendida entre aproximadamente 37°C y 52°C.

3.2. Análisis del clima

Para modelar el clima de Dubái, en primer lugar, se ha tenido en cuenta la temperatura media del aire durante el verano de Dubái. Esta magnitud representa la energía térmica promedio contenida en la masa atmosférica circundante, la cual es fundamental para comprender el comportamiento térmico global del ambiente. Para realizar el análisis del clima nos basamos en la base de datos climáticos del verano en Dubái en el año 2023, que quedan adjuntos en el Anexo B.

Adicionalmente, se ha incorporado la temperatura diaria media del cielo, la cual se define como la temperatura aparente de la atmósfera. Esta variable, aunque no corresponde a una medida física directa como la temperatura del aire, constituye una percepción subjetiva de la sensación térmica experimentada al observar el cielo y su entorno. Su variación está intrínsecamente ligada a la cantidad de radiación solar incidente que alcanza la superficie terrestre, siendo, por tanto, un indicador clave de las condiciones ambientales locales.

Es importante destacar que la inclusión de estas variables en la representación del clima de Dubái proporciona una visión más completa y detallada de las condiciones climáticas experimentadas por los habitantes y visitantes de la ciudad.

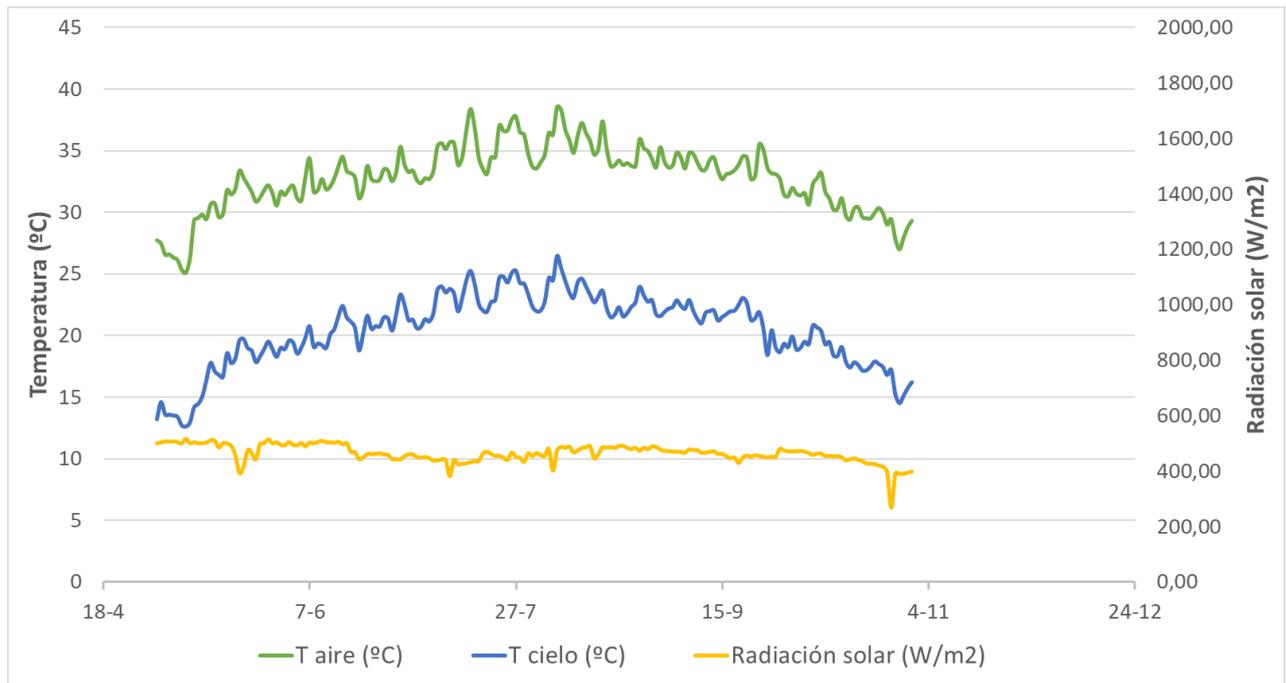


Figura 13: Clima de Dubái en verano. Fuente: Elaboración propia

Como se puede observar, se obtienen máximas medias diarias de temperatura del aire de unos 38,4°C, esto quiere decir que en tramos horarios se llega a alcanzar temperaturas de hasta 46,3°C. A todo esto, se le suma radiaciones solares máximas, por lo que nos podemos hacer una idea de la magnitud del problema.

A modo de clarificar y poder mostrar mejor la representación del clima de Dubái, se selecciona un día tipo de cada mes de verano. Se expone una tabla resumen con los días tipos seleccionados y se adjunta en el Anexo C las gráficas correspondientes para la elección de los mismos.

Tabla 3–3. Selección del día tipo para cada mes de verano

Meses	Día	Radiación solar [W/m ²]
Mayo	15/05/2023	500,63
Junio	13/06/2023	501,64
Julio	24/07/2023	488,85
Agosto	23/08/2023	483,76
Septiembre	11/09/2023	466,55
Octubre	14/10/2023	449,38

Después de seleccionar el día representativo de cada mes de verano, se lleva a cabo un análisis climático detallado. Este análisis incluye la representación de la temperatura del aire y la temperatura del cielo para cada hora del día seleccionado. Además, se muestra la radiación solar incidente en la superficie para cada instante de tiempo a lo largo del día.

El análisis incluye la evaluación de la radiación solar que incide en la superficie a lo largo del día. Este factor es determinante para comprender el balance energético de la superficie terrestre y sus efectos sobre el microclima local. La radiación solar total se cuantifica para cada hora, lo que permite observar cómo las fluctuaciones en la intensidad solar afectan tanto a la temperatura del aire como a la del cielo.

A continuación, se presentan los dos escenarios más extremos que pueden encontrarse en el clima estival de la región:

En primer lugar, el mes de julio, que se caracteriza por ser extremadamente caluroso, con temperaturas del aire que alcanzan valores cercanos a los 45°C. Este nivel de calor representa una condición climática severa que impacta significativamente el confort térmico de los habitantes.

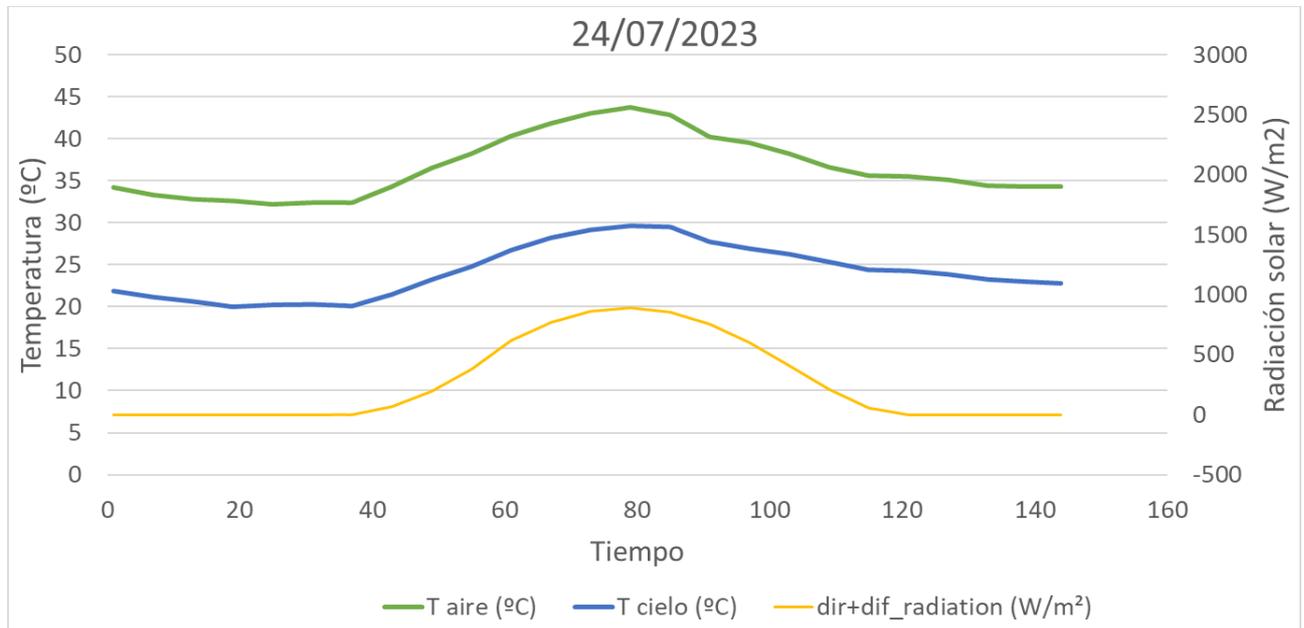


Figura 14: Radiación solar del 24/07/2023

En contraste, se analiza el mes de verano menos caluroso, en el cual las temperaturas del aire alcanzan aproximadamente los 35°C. Aunque relativamente más moderada, esta situación sigue siendo crítica y contribuye al malestar térmico ambiental de la población.

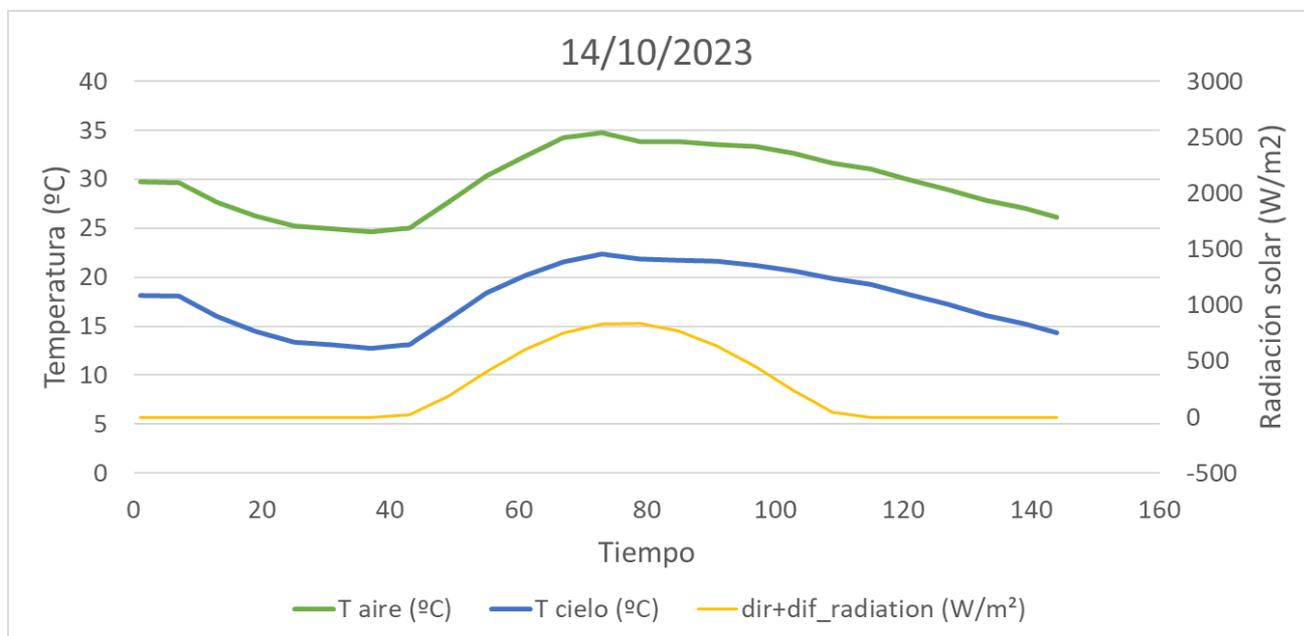


Figura 15: Radiación solar del 14/10/2023. Fuente: Elaboración propia

Ambos escenarios ilustran claramente la influencia predominante de la radiación solar total en el aumento de las temperaturas ambientales. En las gráficas correspondientes, se observa cómo la intensidad de la radiación solar contribuye al incremento térmico, exacerbando las condiciones de calor y afectando el bienestar de los residentes.

Este enfoque proporciona una visión integral y detallada del comportamiento climático durante cada hora del

día tipo seleccionado para cada mes de verano. Al correlacionar las temperaturas del aire y del cielo con la radiación solar, se obtiene una comprensión más profunda de las dinámicas térmicas y de radiación en el entorno urbano, lo que es esencial para la planificación urbana, la gestión de recursos energéticos y el diseño de estrategias de adaptación al cambio climático.

3.3. Análisis de las temperaturas superficiales de pavimentos

3.3.1 Situación convencional

Para comprender cómo las altas temperaturas afectan a las superficies pavimentadas, especialmente aquellas expuestas al sol, se lleva a cabo un análisis contemplando los rangos de temperaturas que se pueden llegar a alcanzar en Dubái para unas condiciones estándar, tomando como referencia un material que presenta características de conductividad térmica de $1,6 \text{ W/m}\cdot\text{k}$, densidad de 2271 kg/m^3 y calor específico de $1075,55 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$.

Se diferencian dos rangos críticos para esas determinadas propiedades del material:

- $36,07^\circ\text{C} \geq \text{TA} < 51,26$: Donde se siente calor, pero no llega a quemar
- $\text{TA} \geq 51,26$: Donde se siente dolor por contacto al calor

Si las características del material cambiasen, también lo harían dichos rangos de temperaturas.

Para realizar un estudio del número de horas que superan dichos rangos se hacen variar propiedades como la absorptividad y el espesor del material, que son determinantes para identificar el comportamiento de los pavimentos ante la exposición al sol.

A continuación, se muestra el porcentaje de horas que se superan los mencionados rangos de temperaturas durante el verano, para $\alpha=0,4=0,5=0,6$ y para $e=2,5\text{cm}=5\text{cm}=7\text{cm}$:

Tabla 3-4. Para propiedades de $\alpha=0,4$ y $e=2,5\text{cm}$

Meses	TA= 51,26°C	TA= 36,07°C
Mayo	19,49%	39,52%
Junio	24,44%	42,78%
Julio	27,28%	45,43%
Agosto	26,88%	43,82%
Septiembre	22,64%	40,69%
Octubre	11,69%	33,47%

Tabla 3-5. Para propiedades de $\alpha=0,5$ y $e=2,5\text{cm}$

Meses	TA= 51,26°C	TA= 36,07°C
Mayo	27,02%	41,53%
Junio	29,86%	44,17%
Julio	32,66%	46,77%
Agosto	31,45%	45,30%
Septiembre	28,06%	41,25%
Octubre	19,89%	36,16%

Tabla 3-6. Para propiedades de $\alpha=0,6$ y $e=2,5\text{cm}$

Meses	TA= 51,26°C	TA= 36,07°C
Mayo	30,91%	43,28%
Junio	33,89%	46,25%
Julio	35,08%	49,19%
Agosto	34,01%	46,91%
Septiembre	30,97%	42,08%
Octubre	24,60%	37,50%

Se observa que, para un espesor constante, la influencia del color del pavimento es notablemente significativa. En el caso de pavimentos con baja absorptividad, el límite superior de temperatura de contacto se supera en un 27% de las horas durante el mes de julio. En contraste, para pavimentos con alta absorptividad, el porcentaje de horas en que se alcanza ese límite superior aumenta hasta el 35% en el mismo mes de verano. Este análisis evidencia la importancia del albedo superficial en la modulación térmica y destaca la necesidad de considerar propiedades reflectantes en el diseño de pavimentos para mitigar el efecto de las altas temperaturas estivales.

A continuación, se representa gráficamente durante el día tipo de agosto, en el que se experimenta condiciones extremas, para una mayor comprensión:

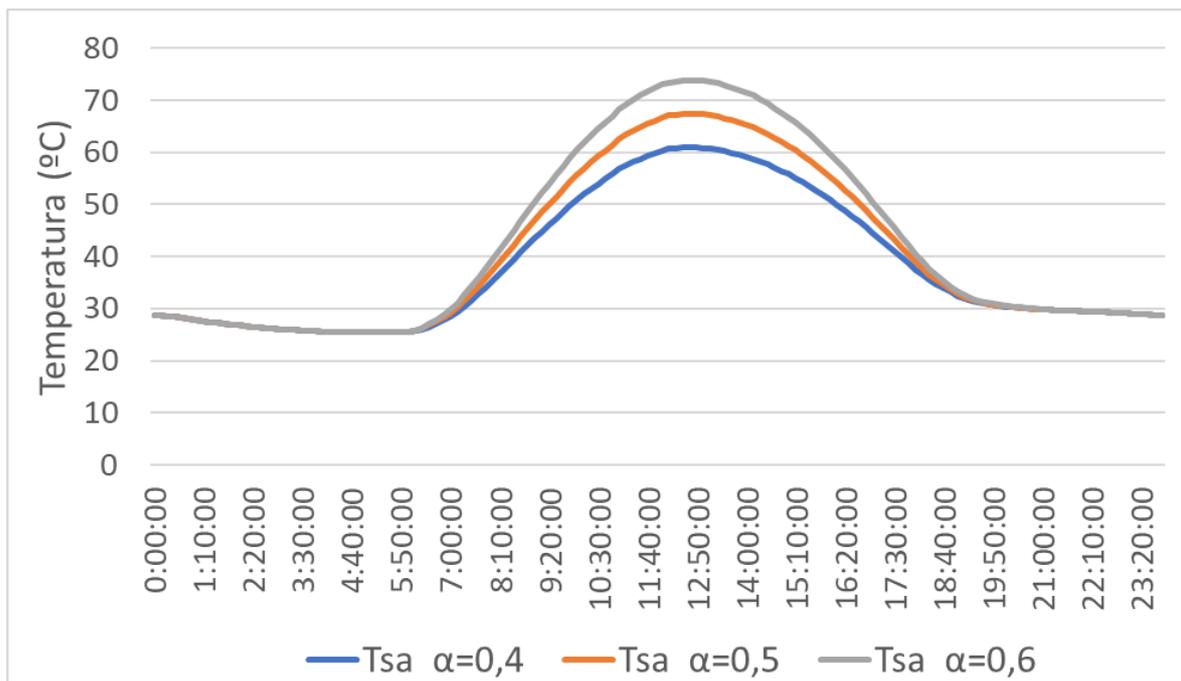


Figura 16: Influencia de la absorptividad para un espesor dado. Fuente: Elaboración propia

Por otro lado, se analiza la influencia del espesor del pavimento, manteniendo una absorptividad constante de 0,5. Este análisis permitirá comprender cómo la variación en el espesor del pavimento afecta la disipación del calor y, en consecuencia, la temperatura experimentada en la superficie de contacto.

Tabla 3–7. Para propiedades de $\alpha= 0,5$ y $e= 2,5\text{cm}$

Meses	TA= 51,26°C	TA= 36,07°C
Mayo	27,02%	41,53%
Junio	29,86%	44,17%
Julio	32,66%	46,77%
Agosto	31,45%	45,30%
Septiembre	28,06%	41,25%
Octubre	19,89%	36,16%

Tabla 3–8. Para propiedades de $\alpha= 0,5$ y $e= 5\text{cm}$

Meses	TA= 51,26°C	TA= 36,07°C
Mayo	27,02%	40,46%
Junio	30,97%	43,75%
Julio	33,06%	47,72%
Agosto	31,99%	45,16%
Septiembre	27,36%	41,53%
Octubre	20,03%	35,62%

Tabla 3–9. Para propiedades de $\alpha= 0,5$ y $e= 7\text{cm}$

Meses	TA= 51,26°C	TA= 36,07°C
Mayo	26,61%	40,86%
Junio	31,25%	45,14%
Julio	32,66%	47,72%
Agosto	31,85%	45,83%
Septiembre	26,11%	41,67%
Octubre	19,89%	35,75%

Como podemos observar, el porcentaje de horas que supera los límites de la temperatura de contacto es bastante similar, con una variación máxima de apenas 1,11% al cambiar el espesor del pavimento.

A continuación, se muestra la influencia del espesor para una absortividad específica, considerando la temperatura sol-aire:

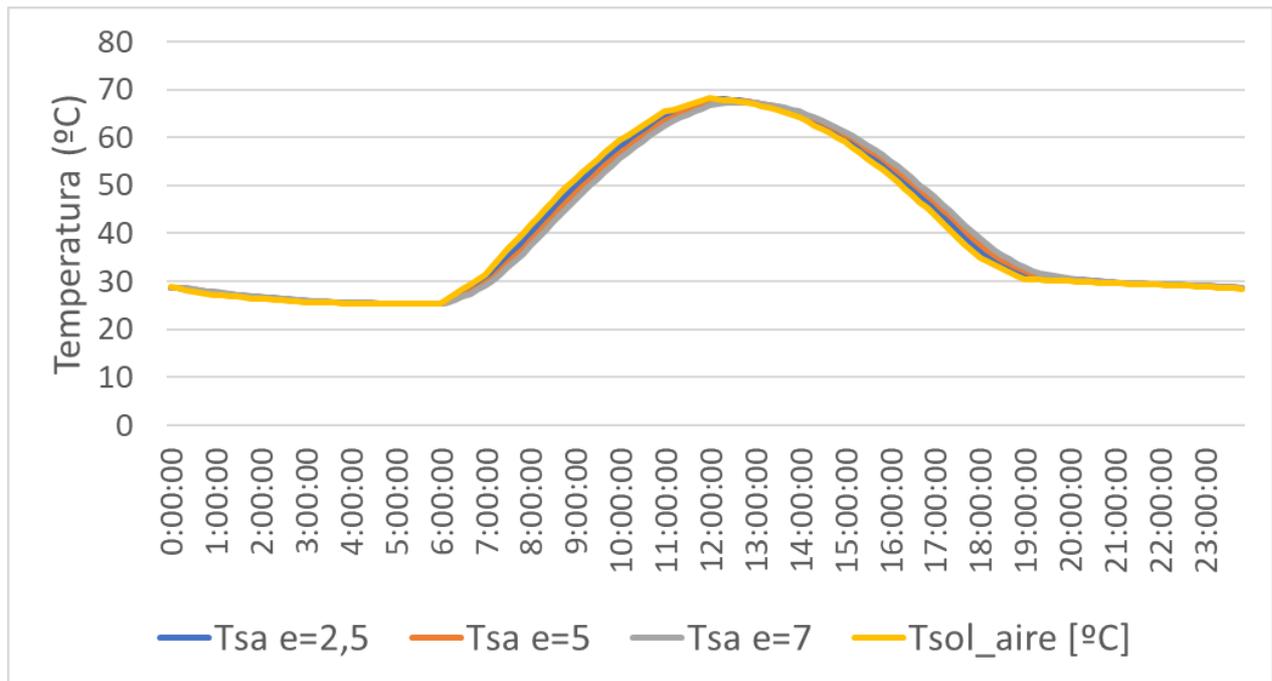


Figura 17: Influencia del espesor para una absorptividad dada. Fuente: Elaboración propia

La influencia del espesor en pavimentos secos es casi despreciable debido a la naturaleza del proceso de transferencia de calor en ausencia de agua. Cuando el pavimento está seco, la conducción es el principal mecanismo de transferencia de calor, y la eficiencia de esta conducción depende más de las propiedades térmicas del material que del espesor. Aunque un pavimento delgado se calienta más rápidamente al inicio de la exposición al sol debido a su menor capacidad térmica, también se enfría más rápidamente una vez que la fuente de calor desaparece. Por otro lado, un pavimento más grueso tarda más en alcanzar la temperatura máxima porque su mayor masa térmica actúa como un amortiguador térmico, acumulando calor más lentamente.

Sin embargo, una vez que un pavimento grueso se ha calentado, retiene el calor durante un período más prolongado de tiempo debido a su mayor capacidad para almacenar energía térmica. Esto significa que, para exposiciones prolongadas al sol, la temperatura superficial de un pavimento grueso y uno delgado tienden a converger, ya que ambos materiales llegan a un equilibrio térmico dictado principalmente por las condiciones ambientales y no por el espesor del material.

Además, en condiciones secas, la ausencia de agua elimina el efecto de convección que podría aumentar significativamente la transferencia de calor en un pavimento más delgado. Sin este efecto, la variación del espesor no tiene un impacto notable en la temperatura superficial del pavimento a lo largo del tiempo. Por lo tanto, en escenarios de exposición prolongada al sol, la diferencia en espesor no altera significativamente el comportamiento térmico del pavimento, lo que explica por qué el espesor es un factor casi despreciable en estas circunstancias.

4 RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD INICIAL

El análisis de sensibilidad es una herramienta fundamental para comprender cómo las variaciones en diferentes parámetros pueden influir en un sistema específico. En este estudio, se realizará un análisis de sensibilidad inicial para investigar la influencia del paso de agua a través de un pavimento en su temperatura superficial. En el Anexo D se incluyen capturas del archivo Excel utilizado para simular y obtener los resultados tanto para el caso seco como para el caso húmedo.

El paso de agua por el pavimento se presenta como una técnica potencial para reducir su temperatura superficial. Este proceso, puede disipar el calor acumulado y mantener temperaturas más bajas. Sin embargo, la efectividad de esta técnica depende de varios factores, como las propiedades térmicas del pavimento, y las condiciones ambientales, entre otros.

En este análisis inicial, se explorarán los efectos de hacer pasar un flujo de agua y sus interacciones con las propiedades del pavimento para determinar su impacto en la temperatura superficial.

Mediante este análisis de sensibilidad, se espera identificar las variables más influyentes y establecer una comprensión preliminar de cómo el enfriamiento mediante el paso de agua puede ser optimizado para aplicaciones prácticas en la reducción de temperaturas superficiales de pavimentos.

4.1. Análisis de propiedades

Mitigar la isla de calor urbano requiere una comprensión detallada de las propiedades del pavimento que influyen en su capacidad para absorber, almacenar y disipar el calor. En este análisis, nos centraremos en algunas de las propiedades más significativas que afectan a la temperatura superficial del pavimento y, por ende, su capacidad para mitigar el efecto de la isla de calor urbano. Estas propiedades influyentes son la absorptividad, el coeficiente de película del agua, el espesor, la temperatura del agua y las características del material, que pasaremos a su estudio a continuación.

Para analizar la influencia de las propiedades más representativas, mantendremos constantes todas las propiedades y haremos variar únicamente la magnitud objeto de estudio.

Este análisis busca cuantificar y comparar la influencia de estas propiedades sobre la temperatura superficial del pavimento. Comprender estas interacciones permitirá diseñar pavimentos más eficientes en la mitigación del efecto de las islas de calor urbano, contribuyendo así a un entorno urbano más sostenible y confortable.

Para evaluar la influencia de las diferentes propiedades en la temperatura superficial del pavimento, se ha seleccionado como referencia el día 11 de agosto de 2023. Este día se corresponde con el percentil 95% de las temperaturas más altas registradas durante el mes de verano en Dubái, representando así una de las condiciones climáticas más extremas y significativas para nuestro estudio.

4.1.1 Influencia de la absorptividad

La absorptividad del pavimento es una medida de su capacidad para absorber radiación solar. Los pavimentos con alta absorptividad tienden a calentarse más rápidamente y alcanzar temperaturas superficiales más altas. Analizar la influencia de la absorptividad permitirá determinar cómo los cambios en el color y la reflectividad del pavimento pueden contribuir a la reducción de la temperatura superficial.

Para evaluar la influencia de la absorptividad en la temperatura superficial del pavimento, se hace variar la absorptividad y se mantienen fijas las demás propiedades con valores de:

Tabla 4-1 Propiedades fijadas variando la absorptividad

Espesor [cm]	Conductividad [W/m·K]	Densidad [kg/m ³]	Cp [J/kgK]	ha [W/m ² K]	hw [W/m ² K]	Tw [°C]
10	1,4	1800	940	15	1000	30

Se han simulado los datos de temperaturas superficiales del pavimento en intervalos de 10 minutos. Estas mediciones se han realizado para dos valores distintos de absorptividad del pavimento: 0.4 y 0.55. La absorptividad de 0.4 representa un pavimento de color claro con menor capacidad de absorción de radiación solar, mientras que la absorptividad de 0.55 corresponde a un pavimento de color más oscuro con una mayor capacidad de absorción.

El análisis detallado de estos datos permitirá comprender cómo varía la temperatura superficial del pavimento en función de su capacidad para absorber la radiación solar. A continuación, se presenta una representación gráfica de la influencia de la absorptividad en la temperatura superficial del pavimento, comparando ambos escenarios y destacando las diferencias observadas a lo largo del día.

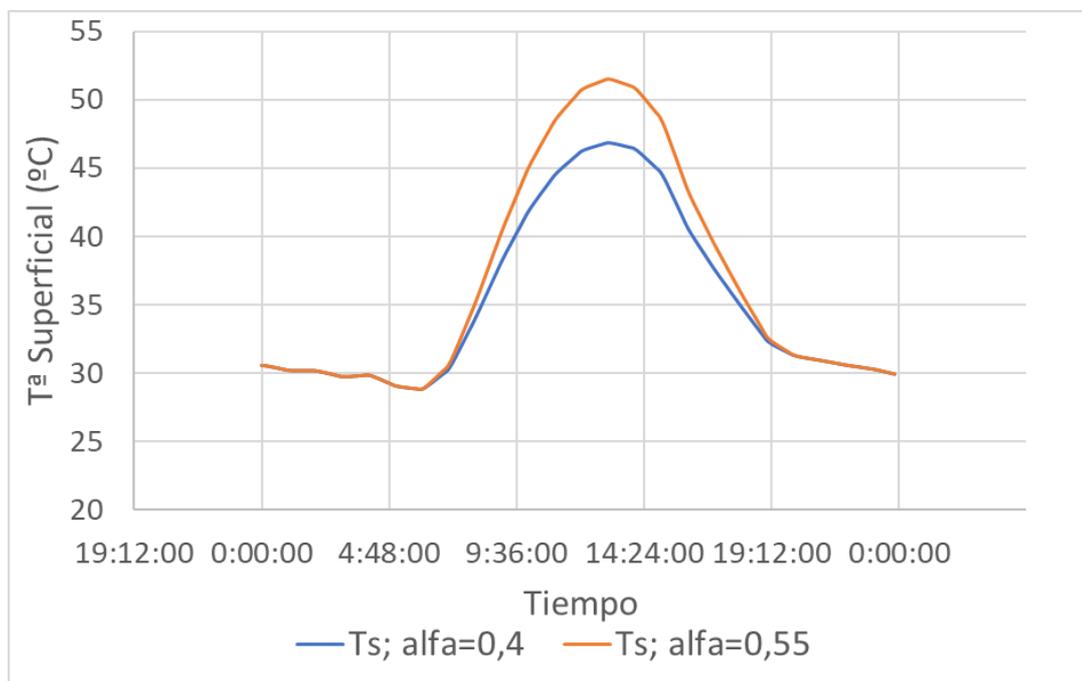


Figura 18: Influencia de la absorptividad. Fuente: Elaboración propia

El análisis de los datos obtenidos revela una notable influencia de la absorptividad del pavimento en su temperatura superficial, especialmente durante las horas de mayor incidencia solar. El incremento en la absorptividad del material implica una mayor absorción de radiación solar, lo que se traduce en un aumento significativo de la temperatura superficial del pavimento.

En condiciones de una mayor absorptividad 0,55, las temperaturas superficiales máximas alcanzan los 51,52°C. En contraste, cuando la absorptividad es de 0,4, la temperatura máxima registrada es de 46,86°C. Esto demuestra que al reducir la absorptividad, se puede disminuir la temperatura superficial del pavimento en casi 5°C, lo que supone una mejora considerable en la mitigación del efecto de las islas de calor urbano.

Asimismo, es importante destacar que durante las horas en las que no hay luz solar directa, la variación en la temperatura superficial es mínima, independientemente de la absorptividad del material. Este comportamiento confirma que la influencia de la absorptividad está estrechamente relacionada con la radiación solar directa.

Estos hallazgos subrayan la importancia de seleccionar materiales con baja absorptividad para el diseño de pavimentos en áreas urbanas, especialmente en regiones con alta exposición solar como Dubái. Al optimizar la elección de materiales en función de su absorptividad, se puede lograr una reducción significativa en la temperatura superficial del pavimento, contribuyendo a una mejora en el confort térmico en los entornos urbanos.

4.1.2 Coeficiente de transferencia de calor por convección

En la transferencia de calor por convección, el coeficiente convectivo del agua (h_w) juega un papel crucial en determinar la eficiencia del intercambio de calor entre una superficie y el fluido que la rodea. Un alto coeficiente convectivo indica un régimen de flujo turbulento, caracterizado por un número de Reynolds (Re) elevado. El régimen turbulento se asocia con movimientos de fluido desordenados y mezclas intensas, lo que facilita una transferencia de calor más rápida y eficiente. Por el contrario, un menor coeficiente convectivo sugiere un régimen de flujo laminar, donde el fluido se mueve en capas paralelas con menor mezcla entre ellas, resultando en una transferencia de calor menos eficiente.

Se emplea como fluido el agua ya que es comúnmente utilizado debido a su alta capacidad calorífica y disponibilidad.

Se estudia la variación de la temperatura superficial del pavimento para los valores fijados de:

Tabla 4-2 Propiedades fijadas variando h_w

Espesor [m]	Conductividad [W/m·K]	Densidad [kg/m ³]	Cp [J/kgK]	h_a [W/m ² K]	Absortividad	T_w [°C]
10	1,4	1800	940	15	0,55	30

Manteniendo estas propiedades constantes podemos realizar el siguiente análisis de sensibilidad para determinar la influencia de la propiedad que varía que en este caso es el coeficiente de película del agua.

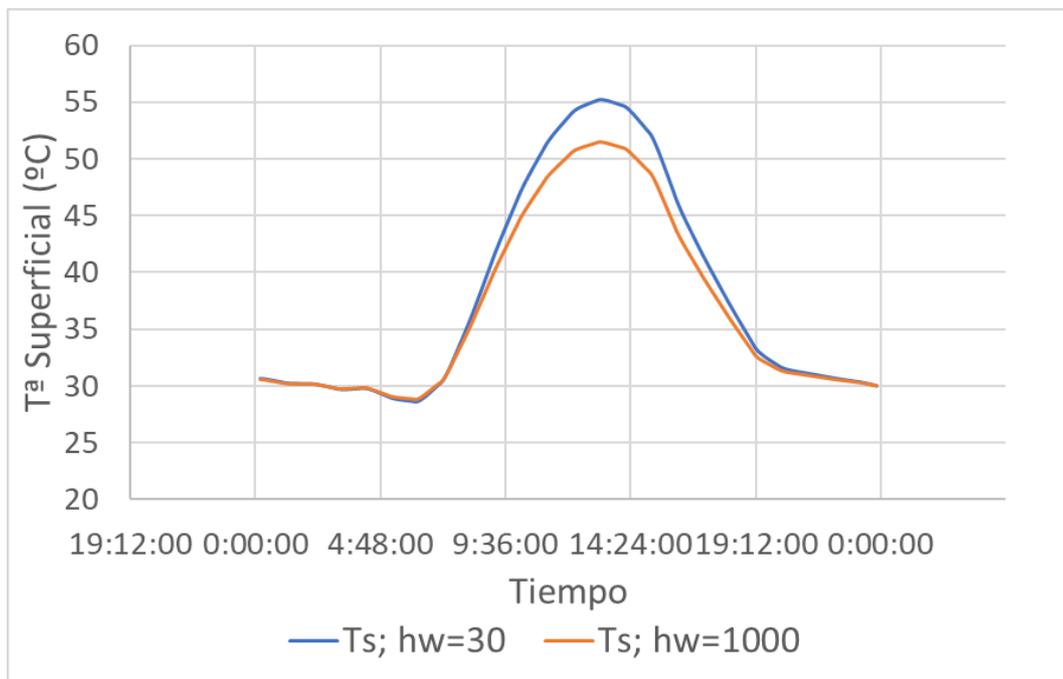


Figura 19: Influencia del coeficiente de película del agua. Fuente: Elaboración propia

La gráfica adjunta proporciona una visión clara de cómo la variación del coeficiente de transferencia de calor por convección del agua influye en la temperatura superficial del pavimento. Un coeficiente de película más alto facilita una mejor transferencia de calor desde el agua hacia el pavimento, lo que resulta en un enfriamiento más efectivo de la superficie del pavimento.

Al analizar los resultados obtenidos, es importante destacar cómo estos diferentes regímenes de flujo afectan la temperatura superficial del pavimento. En condiciones de alto h_w y régimen turbulento, la transferencia de calor entre el pavimento y el aire circundante es más efectiva. Esto significa que, durante el día, el pavimento puede

disipar calor más rápidamente hacia el aire, reduciendo su temperatura superficial más eficazmente que en un régimen laminar. Por la noche, el mismo mecanismo permite que el pavimento se enfríe más rápido.

Sin embargo, en un régimen laminar con un menor h_w la transferencia de calor es menos eficiente debido a la naturaleza más ordenada y menos mezclada del flujo de aire. Esto puede resultar en una acumulación de calor en la superficie del pavimento durante el día, ya que el calor se disipa más lentamente. Por la noche, el enfriamiento también es más lento, manteniendo temperaturas superficiales más altas durante un período prolongado.

La gráfica adjunta proporciona una visión clara de lo comentado anteriormente. Donde la temperatura superficial del pavimento puede reducirse hasta casi 4°C alrededor de las 14:00 horas, que es cuando la temperatura superficial del pavimento alcanza su máximo diario. En otras horas del día, la diferencia en la temperatura superficial debido a la variación del coeficiente de película no es tan pronunciada, pero sigue siendo significativa.

En resumen, el coeficiente convectivo y el régimen de flujo asociado juegan un papel vital en la gestión térmica de los pavimentos. Entender y optimizar estos factores puede llevar a un diseño más eficiente y confortable, especialmente en ambientes desafiantes. Estos resultados tienen importantes implicaciones para el diseño de pavimentos en climas extremos como el de Dubái. En zonas donde se espera un alto coeficiente convectivo debido a vientos fuertes o condiciones que favorecen el régimen turbulento, los pavimentos pueden beneficiarse de una disipación de calor más rápida.

4.1.3 Temperatura del agua

La temperatura del agua utilizada para enfriar el pavimento también juega un papel importante. Agua más fría puede absorber más calor del pavimento, reduciendo su temperatura superficial de manera más efectiva. Evaluar esta variable ayudará a optimizar las condiciones de enfriamiento para una mayor eficiencia térmica.

Para observar la influencia de la temperatura del agua sobre el pavimento, se considera su variación en los valores de 31, 32, 28, 29 y 30°C . Se analiza la variación de la temperatura superficial del pavimento manteniendo constantes las propiedades enumeradas en la tabla a continuación:

Tabla 4–3 Propiedades fijadas variando T_w

Espesor [cm]	Conductividad [W/m·K]	Densidad [kg/m ³]	Cp [J/kgK]	h_a [W/m ² K]	Absortividad	h_w [W/m ² K]
10	1,4	1800	940	15	0,55	1000

A continuación, se grafica la influencia de variar la temperatura del agua fijando las propiedades anteriores:

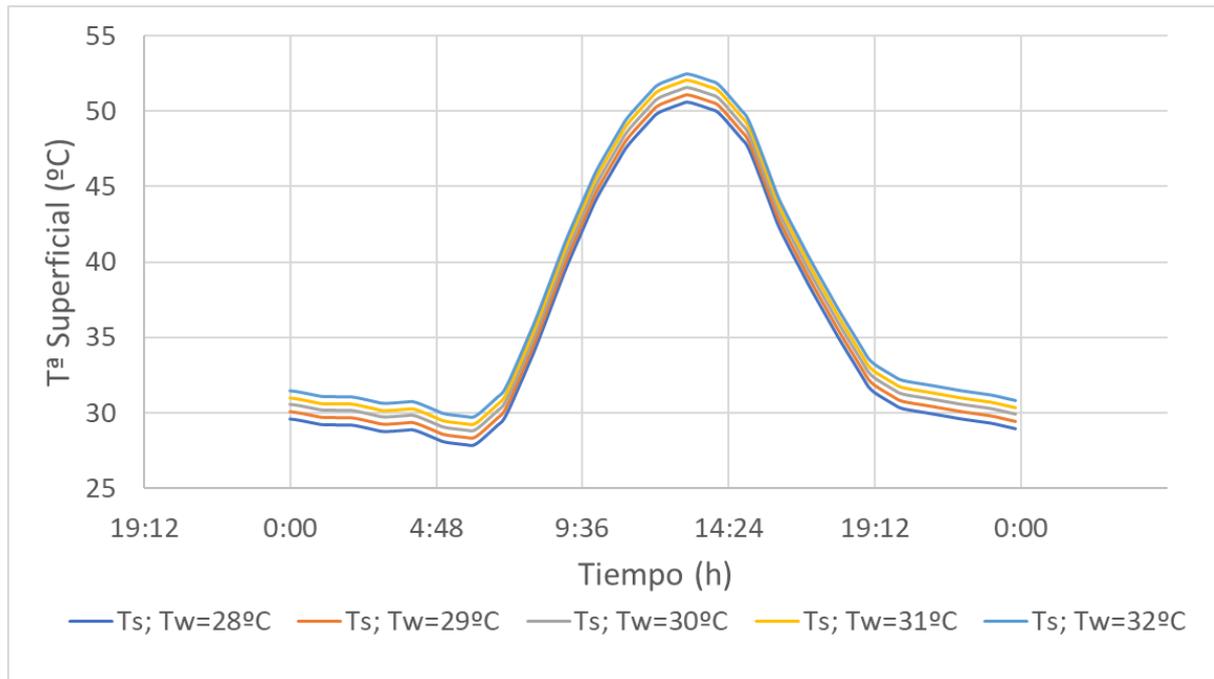


Figura 20: Influencia de la temperatura del agua. Fuente: Elaboración propia

Es importante considerar que las temperaturas del agua en Dubái no son particularmente bajas, lo que limita la posibilidad de realizar comparaciones con valores significativamente reducidos. Sin embargo, al analizar los límites de la temperatura del agua disponible, se observa una clara influencia en la reducción de la temperatura superficial del pavimento.

Para ilustrar esta influencia, se han comparado los efectos de diferentes temperaturas del agua dentro de los rangos típicos encontrados en Dubái. Se ha observado que al utilizar agua a una temperatura de 32°C, las temperaturas superficiales máximas del pavimento alcanzan los 52,47°C. En contraste, cuando se emplea agua a una temperatura de 28°C, las temperaturas superficiales máximas llegan a valores de 50,57°C. Teniendo en cuenta que para las mismas propiedades del material, pero en el caso de no hacer pasar agua por el pavimento la temperatura máxima que se llegaba a alcanzar para el mismo instante de tiempo era de 70,52°C, al hacer pasar agua se consigue reducir la temperatura superficial del pavimento en casi 20°C, lo que constituye una opción efectiva.

Esta tendencia de reducción en la temperatura superficial del pavimento con el uso de agua más fría es consistente en todas las horas del día, independientemente de la variación diaria de la temperatura ambiental. El enfriamiento es más efectivo durante las horas de mayor insolación, pero la influencia de la temperatura del agua es constante y significativa a lo largo de todo el día.

Este análisis subraya la importancia de optimizar la temperatura del agua utilizada para el enfriamiento del pavimento. Aunque las diferencias de temperatura del agua en Dubái no son extremas, incluso pequeñas variaciones pueden tener un impacto notable en la mitigación del efecto de las islas de calor urbano.

4.1.4 Influencia de las características del material

Las características intrínsecas del material del pavimento, como su densidad, conductividad térmica y capacidad calorífica, son determinantes fundamentales en su comportamiento térmico.

Materiales con diferentes densidades tendrán distintas capacidades para almacenar calor, afectando así la temperatura superficial. Por otro lado, la conductividad térmica influye en la velocidad a la que el calor se propaga a través del pavimento. Materiales con alta conductividad pueden disipar el calor más rápidamente. Por último, la capacidad calorífica define la cantidad de calor que un material puede almacenar por unidad de masa.

Materiales con alta capacidad calorífica pueden modelar cambios bruscos de temperatura.

La cantidad de energía solar que puede ser absorbida o reflejada por un material depende de las propiedades físicas del material, especialmente aquellas relacionadas con la superficie del material.

Para este análisis, se mantienen constantes una serie de propiedades y se varían las propiedades del material, creando 4 grupos de materiales con propiedades térmicas diferentes, que se presentan a continuación en una tabla para una mayor claridad visual a modo de resumen:

Tabla 4-4 Propiedades fijadas variando propiedades del material

Espesor [cm]	ha [W/m ² K]	Absortividad	hw [W/m ² K]	Tw [°C]
10	15	0,55	1000	30

Tabla 4-5 Variación de las propiedades del material

Materiales	Conductividad [W/m·K]	Densidad [kg/m ³]	Calor específico [J/kgK]
Material 1	1,4	1800	940
Material 2	1,5	1950	900
Material 3	1,6	2100	850
Material 4	1,7	2250	800

Se expone gráficamente la influencia que tiene las propiedades del material en la reducción de la temperatura superficial del pavimento:

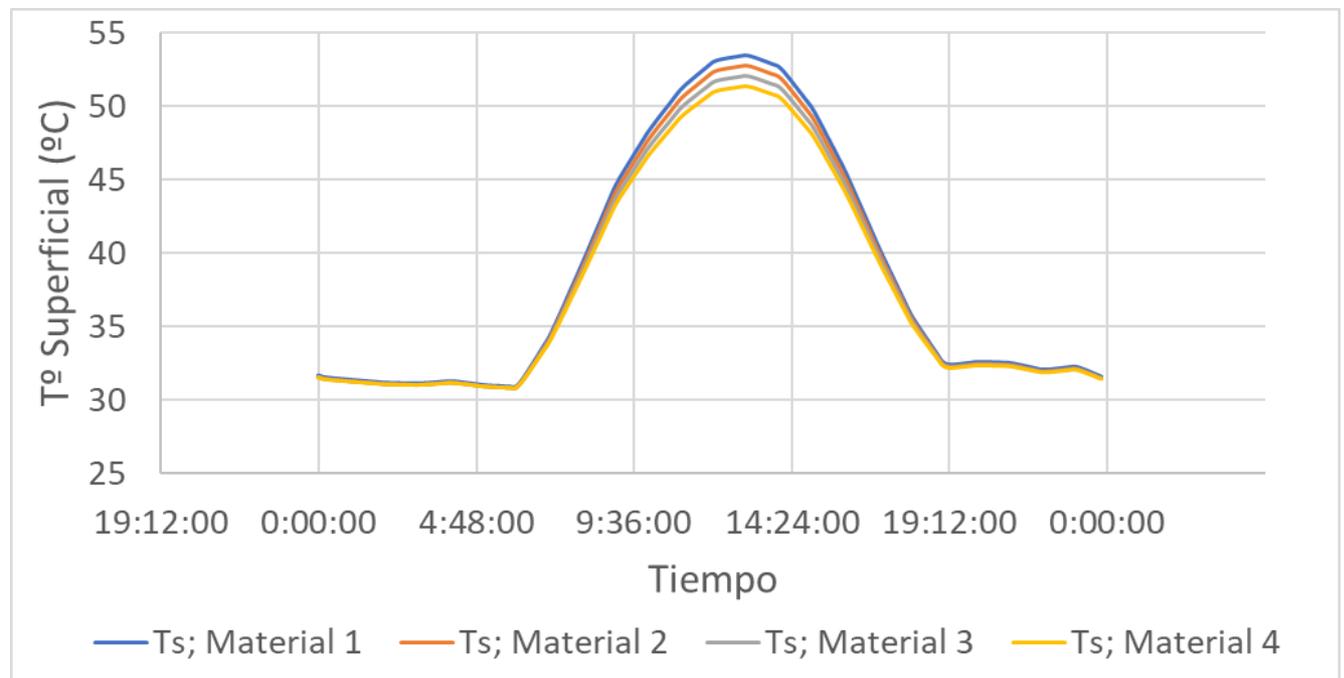


Figura 21: Influencia de diferentes materiales. Fuente: Elaboración propia

El Material 1 presenta la menor conductividad térmica y la densidad más baja entre los cuatro materiales, además del calor específico más alto. Estas propiedades combinadas resultan en la temperatura superficial más elevada del pavimento. A medida que aumentamos la conductividad térmica y reducimos el calor específico (desde el Material 2 al Material 4), la temperatura superficial disminuye ligeramente. El Material 4, que posee la mayor conductividad térmica y el menor calor específico, muestra la menor temperatura superficial del pavimento.

Esto se debe a que una mayor conductividad térmica permite al material disipar el calor más eficientemente,

resultando en una menor acumulación de calor en la superficie. Además, un aumento en la densidad y una disminución en el calor específico reduce la capacidad del material para almacenar calor, contribuyendo a una menor temperatura superficial.

El análisis de las propiedades térmicas y físicas del material demuestra que estas influyen directamente en la temperatura superficial. Materiales con mayor conductividad térmica y menor calor específico son más efectivos en la reducción de la temperatura superficial, por lo que el Material 4 se convierte en el material más adecuado para este propósito. Este conocimiento puede ser utilizado en la selección de materiales para pavimentos con el objetivo de reducir las temperaturas superficiales, minimizando el efecto de las islas de calor urbano y mejorando el confort térmico.

4.1.5 Influencia del espesor

El espesor del pavimento es un factor determinante en la regulación de la temperatura superficial del mismo, influenciando significativamente su capacidad para absorber, almacenar y disipar calor. Este análisis se centra en la evaluación de tres espesores representativos: 0,06 m, 0,08 m y 0,1 m. La comparación entre estos espesores permitirá entender mejor cómo varía la temperatura superficial en función del espesor del pavimento, al hacer pasar agua por debajo del pavimento bajo condiciones climatológicas extremas.

Para proceder con el análisis, se han fijado las propiedades térmicas y físicas del pavimento, manteniéndolas constantes para asegurar que las diferencias observadas en la temperatura superficial sean exclusivamente atribuibles al espesor. Las condiciones climatológicas utilizadas corresponden a un día con radiación solar máxima, seleccionado específicamente para evaluar el comportamiento del pavimento en escenarios límite.

Tabla 4-6 Propiedades fijadas variando el espesor

T_w [°C]	Conductividad [W/m·K]	Densidad [kg/m ³]	C_p [J/kgK]	h_a [W/m ² K]	Absortividad	h_w [W/m ² K]
1000	1,4	1800	940	15	0,55	1000

A continuación, se presenta la representación gráfica de la influencia del espesor del pavimento en la temperatura superficial a lo largo del día bajo las condiciones climatológicas extremas seleccionadas:

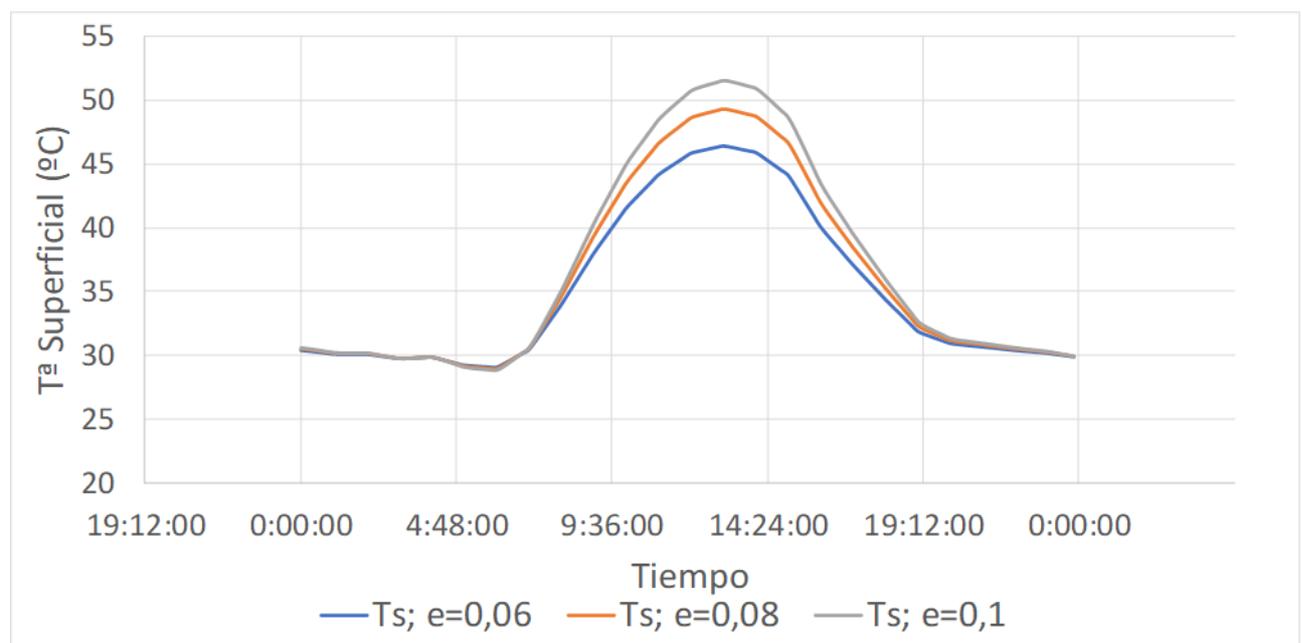


Figura 22: Influencia del espesor

Durante los periodos de máxima radiación solar, el pavimento con un espesor de 0,06 m alcanza una temperatura superficial de 46,43 °C. La menor masa térmica y capacidad de almacenamiento de calor de este espesor resultan en una rápida absorción y disipación del calor, permitiendo una reducción más efectiva de la temperatura superficial.

Aumentar el espesor a 0,08 m. La temperatura superficial alcanzada es intermedia entre los otros dos espesores, evidenciando una mayor estabilidad térmica sin un incremento significativo en la capacidad de mitigación térmica.

Con un espesor de 0,1 m, la temperatura superficial del pavimento alcanza los 51,53 °C durante las horas de máxima radiación solar. Aunque este mayor espesor proporciona una mayor inercia térmica y capacidad de almacenamiento, haciendo aumentar la temperatura superficial del pavimento, contraria a la creencia común de que un mayor espesor siempre reduce la temperatura superficial. En este caso no es así debido a que se hace pasar agua por el interior de la superficie.

Al hacer pasar agua por debajo del pavimento a una temperatura inferior a la temperatura superficial del mismo es ventajoso para la reducción de la temperatura superficial del pavimento, ya que un espesor de pavimento menor puede potenciar este efecto. El agua que circula por debajo del pavimento puede absorber el calor del pavimento, actuando como un sistema de enfriamiento por convección.

El agua, al ser un buen conductor térmico, puede transportar el calor lejos del pavimento y reducir su temperatura. Un pavimento más delgado tiene menos masa térmica. Esto significa que puede calentarse y enfriarse más rápidamente en comparación con un pavimento más grueso. Si el pavimento es más delgado, el calor se puede transferir más rápidamente al agua que circula por debajo, mejorando la eficiencia del enfriamiento. Con un pavimento más delgado, la distancia que el calor debe recorrer para llegar al agua es menor. Esto puede resultar en una transferencia de calor más eficiente y una reducción más rápida de la temperatura superficial.

El análisis demuestra que, los pavimentos de menor espesor son más efectivos en la reducción de la temperatura superficial del pavimento bajo condiciones de radiación solar extrema, al hacer pasar agua. Un espesor reducido facilita una rápida disipación del calor acumulado, manteniendo la superficie más fresca. La diferencia de temperatura entre el espesor mínimo y máximo analizado es significativa, con una variación de aproximadamente 5 °C, lo que resalta la importancia del espesor del pavimento en la regulación térmica.

En resumen, combinar un sistema de enfriamiento por agua con un pavimento de menor espesor puede ser una estrategia efectiva para reducir la temperatura superficial del pavimento. Para lograr una reducción efectiva de la temperatura superficial del pavimento y mitigar el efecto de las islas de calor urbano, es recomendable considerar espesores más delgados, siempre y cuando se mantengan las propiedades estructurales y de durabilidad requeridas.

4.2. Comparación condiciones secas respecto enfriamiento por agua

La gestión térmica de las superficies urbanas es un tema de creciente importancia debido al efecto de las islas de calor, en este contexto, el papel del agua como elemento regulador de la temperatura superficial de los pavimentos cobra relevancia. La interacción entre el agua y el pavimento convencional puede influir significativamente en la capacidad de disipación de calor, la reducción de la temperatura superficial y, en consecuencia, en la mitigación del efecto de las islas de calor.

El agua, cuando se utiliza en sistemas de enfriamiento pasivo, puede absorber y transferir calor de manera eficiente. Al enfriar la superficie del pavimento, el agua ayuda a reducir las temperaturas extremas que pueden alcanzarse durante los periodos de alta radiación solar.

Para el análisis, se ha seleccionado el día 11 de agosto de 2023, caracterizado por ser uno de los días más calurosos del año en Dubái. Se considerarán diferentes escenarios para evaluar la influencia del agua en la reducción de la temperatura superficial del pavimento. Los escenarios analizados incluyen:

- Caso Seco: En este escenario, el coeficiente de transferencia de calor por convección se considera nulo, lo que representa un pavimento seco sin la influencia del agua.

- Caso con Agua: Se simula la presencia de agua con un coeficiente de transferencia de calor por convección de $1000 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$, reflejando una condición donde el agua ayuda significativamente en la transferencia de calor desde el pavimento.

Para asegurar la validez del análisis, las propiedades térmicas del material del pavimento se mantendrán constantes en ambos escenarios. La temperatura del agua se ha fijado en $29 \text{ }^\circ\text{C}$, un valor promedio representativo del agua en Dubái durante esa época del año.

Esta metodología permitirá evaluar la eficacia del agua en la reducción de la temperatura superficial del pavimento, proporcionando datos técnicos y cuantitativos esenciales para la implementación de estrategias de enfriamiento pasivo en entornos urbanos. La comparación entre el caso seco y el caso con agua permitirá identificar el potencial de mitigación térmica que el uso de agua puede ofrecer, contribuyendo así a un mejor diseño y gestión de infraestructuras urbanas para combatir el efecto de las islas de calor.

4.2.1 Evolución de la temperatura superficial con la influencia del agua

Con el objetivo de obtener una visión general de la evolución de la temperatura superficial del pavimento en dos escenarios distintos (seco y húmedo), se ha llevado a cabo una simulación cuyos resultados se han graficado utilizando Excel. La gráfica se ha generado tomando en cuenta las variaciones horarias durante el día más caluroso del año, permitiendo así una representación detallada y precisa de las fluctuaciones térmicas.

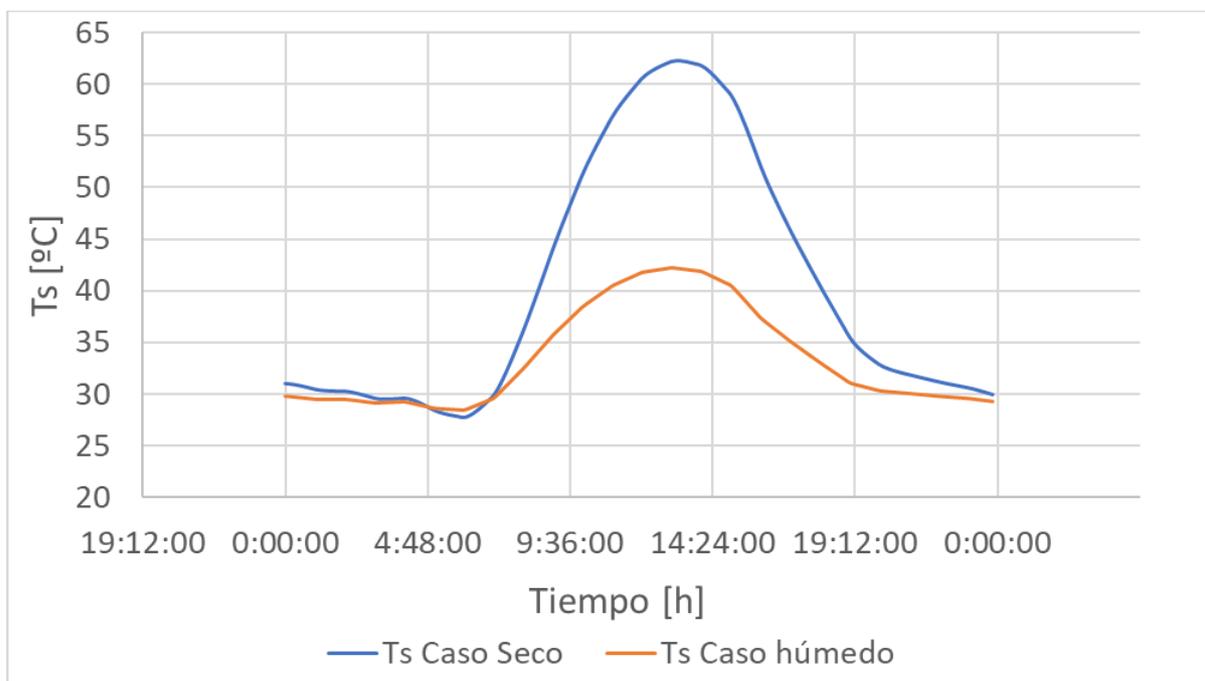


Figura 23: Influencia en la T^a superficial al hacer pasar agua

La gráfica obtenida de esta simulación revela diferencias notables en el comportamiento térmico del pavimento bajo las dos condiciones analizadas. Los datos sugieren que la introducción de agua en la superficie del pavimento tiene un efecto considerable en la reducción de su temperatura durante las horas más calurosas del día.

En el escenario sin la aplicación de agua, la temperatura superficial del pavimento puede alcanzar un máximo de aproximadamente $62,22^\circ\text{C}$. Este valor se registra durante las horas pico de calor, lo que indica una elevada absorción y retención de energía térmica por parte del material del pavimento. En contraste, en el escenario con aplicación de agua, la temperatura superficial máxima del pavimento es significativamente menor, rondando los $42,27^\circ\text{C}$. Este descenso en la temperatura se debe al efecto de enfriamiento que proporciona el agua, la cual facilita la disipación del calor y reduce la acumulación térmica en la superficie del pavimento.

El hallazgo de que la aplicación de agua puede reducir la temperatura superficial del pavimento en hasta 20°C

es de gran importancia para el diseño y mantenimiento de infraestructuras, especialmente en regiones de clima cálido.

4.2.2 Variación de la temperatura máxima

Para evaluar la influencia del agua en la reducción de la temperatura superficial del pavimento, se ha procedido a obtener el valor máximo y mínimo de la temperatura superficial registrada para el día 11 de agosto de 2023. Tanto como para el caso seco como para el húmedo.

Posteriormente, se ha determinado la variación de temperatura superficial obtenida, realizando la diferencia entre los valores máximos y los mínimos para comparar el escenario seco y el escenario húmedo.

Tabla 4–7: Variación de la temperatura superficial del día

	Caso Seco	Caso Húmedo	Variación
Ts Max	62,22°C	42,27°C	19,96°C
Ts Mín	27, 75°C	28,46°C	0,70°C

El análisis comparativo entre el caso de pavimento seco y el pavimento por el cual circula agua revela que la utilización de agua puede reducir significativamente la temperatura superficial del pavimento. Durante las horas de máxima incidencia solar, se logra una disminución de temperatura superficial de hasta 20°C.

Para el caso de menor radiación solar, las temperaturas mínimas registradas muestran una variación menos pronunciada. En este periodo, la influencia del agua no es tan significativa, resultando en una diferencia de temperatura superficial de aproximadamente 0,7°C.

Aunque su impacto es menor durante las horas de baja radiación solar. En horas de máxima incidencia solar, típicamente alrededor del mediodía, la superficie del pavimento puede alcanzar temperaturas extremas. Es por ello, que el uso del agua en estas horas cruciales actúa como un mecanismo de enfriamiento pasivo, reduciendo eficazmente la temperatura y mejorando el confort térmico del entorno.

4.2.3 Temperatura media del día

Se ha procedido calculando el promedio de las temperaturas superficiales registradas cada 10min a lo largo del día 11 de agosto de 2023.

A continuación, se grafican las temperaturas medias superficiales para el día seleccionado, permitiendo una clara comparación entre el escenario seco y el húmedo.

Tabla 4–8: Temperatura media caso seco y húmedo

	Caso Seco	Caso Húmedo
\bar{T}_s [°C]	40,35	33,50

El promedio representado deja ver que la media de la temperatura superficial para el caso seco es bastante superior al del caso húmedo, mostrando en este último una evolución de la temperatura superficial del pavimento más estable e inferior al del caso seco, que pueden atribuirse a la capacidad del agua para absorber y disipar calor.

Estos resultados subrayan la eficacia de utilizar agua como medio de enfriamiento pasivo en pavimentos, contribuyendo a la mejora del confort térmico en áreas urbanas.

4.2.4 Sobrecalentamiento superficial

El sobrecalentamiento superficial se refiere al aumento de la temperatura en la superficie de materiales, como el pavimento, debido a la exposición a fuentes de calor, principalmente la radiación solar. Este fenómeno es particularmente común en áreas urbanas, especialmente durante los meses de verano, y puede tener varios efectos adversos. El análisis de este aspecto nos permitirá obtener una visión detallada sobre la distribución y la magnitud del calentamiento superficial en diferentes condiciones.

Lo que se podría afirmar es que, para reducir la isla de calor urbana, es necesario evitar el sobrecalentamiento superficial y promover la transpiración del suelo. Por esta razón, se realizará un estudio detallado del porcentaje de horas totales solares en las que el pavimento supera ciertos intervalos de sobrecalentamiento. Este análisis permitirá identificar las condiciones bajo las cuales se produce el sobrecalentamiento y evaluar la eficacia de hacer pasar agua por el pavimento.

Para llevar a cabo este análisis se van a seleccionar los dos casos a estudiar, manteniendo constantes las propiedades intrínsecas del material, mientras se varían las siguientes características:

Tabla 4–9: Especificación de casos

Casos	e[m]	k[W/m·K]	ρ [kg/m ³]	Cp[J/kgK]	ha[W/m ² K]	α	hw[W/m ² K]	Tw[°C]
Caso 1	0,06	1,7	2250	800	15	0,4	1000	28
Caso 2	0,1	1,7	2250	800	15	0,55	30	32

Se han seleccionado estos dos casos de estudio debido a las siguientes razones:

Para el Caso 1, se busca analizar la situación más favorable, caracterizada por un coeficiente de transferencia de calor (hw) de 1000, lo cual permite una transferencia de calor muy eficiente. Esta condición es típica de situaciones con flujo turbulento, donde el agua se mueve rápidamente, aumentando significativamente la tasa de transferencia de calor. Además, se utiliza agua a una temperatura de 28°C, la más baja disponible, lo que contribuye a una mayor reducción de la temperatura superficial, minimizando así el sobrecalentamiento.

En contraste, el Caso 2 se define como el escenario más limitante y, por tanto, el más desfavorable. En este caso, se tiene un hw de 30, indicando una transferencia de calor mucho menos eficiente, típica de condiciones de flujo laminar. Además, el agua se encuentra a una temperatura de 32°C, superior a la del Caso 1, lo que reduce aún más la eficiencia de la transferencia de calor y, por ende, aumenta el riesgo de sobrecalentamiento superficial.

Tras la simulación y la obtención de las temperaturas superficiales del pavimento para los dos casos durante todo el verano en Dubái, se procedió a calcular el sobrecalentamiento utilizando la siguiente fórmula:

$$T_{\text{sobrecalentamiento}} = T_{\text{superficial}} - T_{\text{aire}} \quad (4-1)$$

Donde T_{aire} se ha obtenido de nuestra base de datos climáticos para el verano de Dubái en 2023, (Anexo B). El análisis del sobrecalentamiento se ha realizado exclusivamente para las horas de sol, ya que es durante este período cuando se espera que ocurra un sobrecalentamiento debido a la intensa radiación solar. Posteriormente, se calculó el porcentaje de horas en las que el pavimento estuvo sobrecalentado para diferentes intervalos

definidos en intervalos de 5 grados Celsius. Finalmente, se graficaron los resultados obtenidos para visualizar el comportamiento del sobrecalentamiento en los distintos casos estudiados.

- Caso 2:

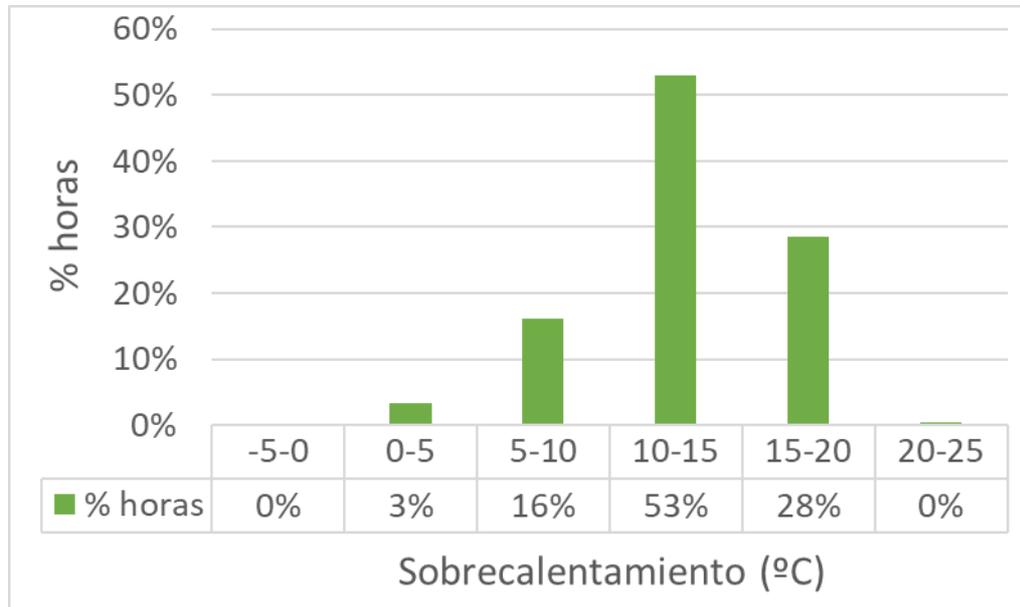


Figura 24: Sobrecalentamiento en el caso 2

La gráfica muestra que en el caso 2, la mayor parte del tiempo, el pavimento experimenta un sobrecalentamiento de 10-15°C (53%) y 15-20°C (28%). Estos intervalos suman un total de 81% del tiempo, lo que indica que el pavimento está en un estado de sobrecalentamiento moderado la mayor parte del tiempo.

- Caso 1:

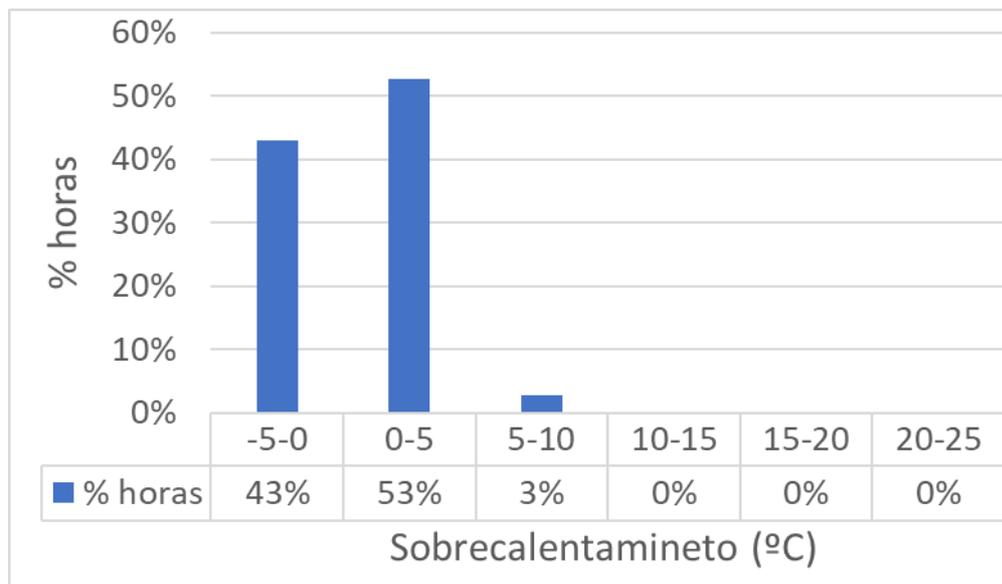


Figura 25: Sobrecalentamiento en el caso 1

Efectivamente, se comprueba lo que se podía llegar a deducir, donde en el caso 1 se aprecia que se reduce bastante el sobrecalentamiento superficial estando la mayor parte del tiempo en sobrecalentamientos de 0°C a 5°C, y no se registran sobrecalentamientos superiores a 10°C. Además, el 43% del tiempo se encuentra en

sobrecalentamiento negativo. El término "sobrecalentamiento negativo" significa que la temperatura del pavimento está más fría que el aire circundante. En el contexto de la temperatura superficial de un pavimento describe una situación en la que la temperatura de la superficie del pavimento está descendiendo, es decir, la superficie del pavimento está más fría que las capas subyacentes o el aire circundante. Este fenómeno tiene varias implicaciones significativas, tanto a nivel de confort para las personas como en términos de impacto ambiental y urbano. Esto sugiere que las condiciones del caso 1 son más favorables para la temperatura superficial del pavimento, ya que se minimizan sus efectos.

Tras el análisis del sobrecalentamiento superficial del pavimento se muestra que la transferencia de calor eficiente y el uso de agua más fría son cruciales para mitigar el sobrecalentamiento. En el Caso 1, con un coeficiente de transferencia de calor alto y agua a 28°C, el pavimento presentó mínimas temperaturas superficiales, mientras que en el Caso 2, con un coeficiente bajo y agua a 32°C, el sobrecalentamiento fue significativo, con un 81% del tiempo en rangos de 10-20°C.

4.2.5 Evaluación de la efectividad de la técnica seleccionada

Para concluir si la innovadora técnica de hacer pasar agua por el pavimento soluciona el problema planteado, se han considerado dos casos que se describen a continuación:

Tabla 4–10 Definición de casos a estudiar

Casos	e [cm]	k [W/m·K]	ρ [kg/m ³]	Cp [J/kgK]	ha [W/m ² K]	α	hw [W/m ² K]	Tw [°C]
Caso 1	8	1,4	1800	940	15	0,4	1000	29
Caso 2	8	1,4	1800	940	15	0,55	1000	29

Se han seleccionado estos dos casos porque, para ese material con las propiedades térmicas específicas, ya se había calculado la temperatura de contacto asociada (Tabla 4-11). Nos centramos en el material que podría ser el más conflictivo para alcanzar nuestros objetivos, el cual tiene límites de temperatura de contacto definidos entre 37,45°C y 53,29°C. Además, realizamos el análisis considerando un espesor intermedio de 0,08 m y una temperatura promedio del agua de 29°C. Estas no son las propiedades más óptimas, pero tampoco las más desfavorables.

Para evaluar la efectividad de la técnica, se contabilizaron las horas del verano en Dubái que superan estos intervalos de confort térmico, con el fin de calcular el porcentaje de tiempo en que dichas temperaturas se exceden durante el verano.

- Caso 1:

Tabla 4–11: % horas caso 1

Rango	% horas
T<37,47	71%
37,47<T<53,29	29%
T>53,29	0%

- Caso 2:

Tabla 4-12: % horas caso 2

Rango	% horas
$T < 37,47$	65%
$37,47 < T < 53,29$	35%
$T > 53,29$	0%

Como se puede observar, los resultados del estudio han sido bastante favorables. En ningún momento se supera una temperatura de contacto (TA) de 53,29°C, lo que produciría dolor por calor. Durante el 100% del tiempo, las temperaturas se mantienen por debajo de este umbral, eliminando así el riesgo de quemaduras por contacto.

5 CONCLUSIÓN

A modo de conclusión de este proyecto, se han explorado diversas tecnologías de pavimentos fríos basándose en el enfriamiento latente y no evaporativo, para reducir la temperatura superficial y mitigar el efecto de isla de calor urbana. Para ello, se ha seleccionado y analizando exhaustivamente la técnica que parecía más viable y efectiva: hacer pasar agua por el pavimento.

Con respecto a los resultados obtenidos, Se estudió la situación inicial en Dubái, evaluando el impacto de la tempera superficial e identificando la gran problemática presente donde deja ver que las temperaturas máximas que alcanza la superficie del pavimento en Dubái pueden llegar a ser de 62,22°C, mientras que al hacer pasar agua por el pavimento se reduce a 42,27°C. Posteriormente, se investigó cómo la técnica seleccionada afectaría en la reducción de la temperatura superficial y se obtiene que al reducir la absorptividad, aumentar el coeficiente de transferencia del agua, disminuir la temperatura del agua y reducir espesores, se consigue reducir la temperatura superficial del pavimento al hacer pasar agua por él. Comprobando finalmente, que esta técnica reduce significativamente la temperatura de contacto, demostrando su eficacia en resolver el problema planteado.

5.1 Limitaciones del estudio

Reducir la temperatura superficial de los pavimentos en Dubái presenta varias limitaciones y desafíos, algunas de ellas son:

- Las temperaturas extremas en Dubái, que pueden limitar la efectividad de las técnicas de enfriamiento
- La disponibilidad de agua en Dubái donde el recurso hídrico puede ser un recurso limitado
- La instalación de sistemas para hacer pasar agua por debajo de los pavimentos puede ser costosa en términos de infraestructura y mano de obra.
- La cantidad de calor que se puede disipar utilizando agua puede ser limitada, especialmente durante los picos de calor, lo que puede no ser suficiente para alcanzar los niveles de confort térmico deseados.
- Implementar sistemas efectivos para recolectar y almacenar agua de lluvia, y garantizar un suministro continuo durante los períodos secos, es un desafío significativo.

En resumen, aunque la técnica de hacer pasar agua por la superficie interior del pavimento tiene el potencial de reducir la temperatura superficial en Dubái, enfrenta importantes limitaciones y desafíos en términos de recursos, costos, eficiencia y durabilidad, que deben ser cuidadosamente considerados y gestionados.

5.2 Aplicaciones futuras

Si se demuestra efectiva en Dubái, esta tecnología puede ser adaptada y aplicada en otras regiones con condiciones climáticas similares, ampliando su impacto positivo. La tecnología puede ser aplicada en otros entornos recreativos y deportivos donde las superficies pavimentadas suelen calentarse considerablemente, como podría ser en parques públicos, paseos marítimos, complejos deportivos y otras áreas urbanas con gran afluencia de personas pueden beneficiarse de esta tecnología, mejorando la habitabilidad y el confort en estos espacios.

También sería interesante integrar sistemas de recolección de agua pluvial o el uso de agua reciclada de otras actividades para el almacenamiento y alimentar el sistema de enfriamiento de pavimentos y optimizar el uso de

recursos hídricos, haciendo la solución más sostenible, reduciendo la demanda de agua y mejorando la eficiencia en el uso de recursos.

Incorporar esta tecnología en la planificación de nuevas áreas urbanas y en la renovación de zonas existentes puede contribuir a ciudades más frescas y habitables, alineadas con los objetivos de sostenibilidad y resiliencia al cambio climático.

5.3 Posibles líneas de investigación

El éxito de esta tecnología puede impulsar más investigaciones y desarrollos en el campo de los pavimentos inteligentes y sostenibles, abriendo nuevas áreas de estudio y aplicaciones prácticas.

Futuras investigaciones pueden desarrollar pavimentos que no solo enfríen la superficie, sino que también filtren el agua, mejorando la calidad del agua reutilizada y proporcionando beneficios adicionales.

Combinando esta tecnología con sistemas de generación de energía solar puede crear soluciones energéticamente autosuficientes, donde el exceso de energía solar se utilice para alimentar bombas y otros componentes del sistema de enfriamiento.

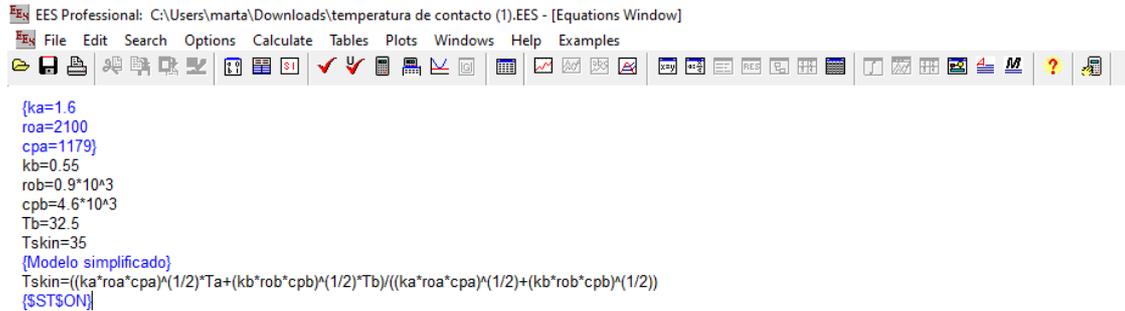
Estas futuras implicaciones y aplicaciones prácticas destacan el potencial de la tecnología de enfriamiento por agua de pavimentos para transformar no solo los parques acuáticos en Dubái, sino también otros entornos urbanos, mejorando la calidad de vida y promoviendo prácticas sostenibles en la gestión de la infraestructura urbana.

REFERENCIAS

- Anupam, B. R., Sahoo, U. C., Chandrappa, A. K., & Rath, P. (2021). Emerging technologies in cool pavements: A review. *Construction and Building Materials*, 299. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123892>
- Armando Aldana Razo. (2021). *Efecto isla de calor urbano*. <https://desarrollosustentableitp.weebly.com/isla-de-calor/la-isla-de-calor>
- CartujaQanat*. (2023). <https://cartujaqanat.com/>
- Chuttersnap. (2022, May 29). *Arquitectura bioclimática*. <https://www.consumer.es/medio-ambiente/como-reducir-emisiones-construccion-arquitectura-bioclimatica-reformas-sostenibles>
- Cristina Ávila Freire. (2018). *PAVIMENTOS REFLECTANTES*. http://www.proyectorpara.com/blog/blog_diseno.php
- David Plata Martín. (2020). *TFM-Barreras como elementos de confinamiento en espacios exteriores*.
- Emerging technologies in cool pavements: A review*. (2021, September 13). <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061821016524>
- GONZÁLEZ JIMÉNEZ, P. (2020). *TFG-COMUNICACIÓN FRENTE AL CAMBIO CLIMÁTICO*.
- Irina Tumini. (2012). *Tesis Doctoral- El microclima urbano*.
- Paulo Javier García Melgar. (2024). *TFM Caracterización experimental de pavimentos fríos en material hormigón*.
- Pavimento drenante*. (2018, June 13). <https://www.dparquitectura.es/productos/20180613/pavimento-drenante-mixto>
- Roberto Rodríguez Álvaro. (2016). *TFM - Estudio Comparativo entre Métodos de Evaluación de Transmitancia Térmica en Cerramientos Opacos de Edificios Existentes*.
- Seifeddine, K., Amziane, S., Toussaint, E., & Ouldboukhite, S. E. (2023). Review on thermal behavior of cool pavements. In *Urban Climate* (Vol. 51). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2023.101667>

ANEXO A: CÓDIGO DE LOS CÁLCULOS EN EES

- Para T_{skin} de 35°C:



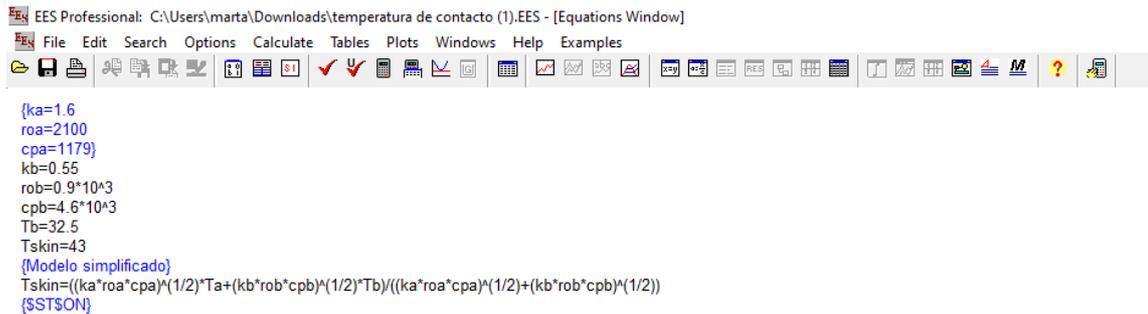
```

EES Professional: C:\Users\maria\Downloads\temperatura de contacto (1).EES - [Equations Window]
File Edit Search Options Calculate Tables Plots Windows Help Examples
{ka=1.6
roa=2100
cpa=1179}
kb=0.55
rob=0.9*10^3
cpb=4.6*10^3
Tb=32.5
Tskin=35
[Modelo simplificado]
Tskin=((ka*roa*cpa)^(1/2)*Ta+(kb*rob*cpb)^(1/2)*Tb)/((ka*roa*cpa)^(1/2)+(kb*rob*cpb)^(1/2))
{$STSON}

```

Figura 26: Cálculo EES para $T_{skin}= 35^{\circ}\text{C}$

- Para T_{skin} de 43°C:



```

EES Professional: C:\Users\maria\Downloads\temperatura de contacto (1).EES - [Equations Window]
File Edit Search Options Calculate Tables Plots Windows Help Examples
{ka=1.6
roa=2100
cpa=1179}
kb=0.55
rob=0.9*10^3
cpb=4.6*10^3
Tb=32.5
Tskin=43
[Modelo simplificado]
Tskin=((ka*roa*cpa)^(1/2)*Ta+(kb*rob*cpb)^(1/2)*Tb)/((ka*roa*cpa)^(1/2)+(kb*rob*cpb)^(1/2))
{$STSON}

```

Figura 27: Cálculo EES para $T_{skin}= 43^{\circ}\text{C}$

ANEXO B: DATOS CLIMÁTICOS DEL VERANO EN DUBÁI

Adjunto una muestra representativa de la tabla de datos climáticos recopilados durante los meses de verano en Dubái, la cual presenta datos registrados cada diez minutos a lo largo de estos meses:

Hora local	T_aire[°C]	Radiation [W/m²]	T_cielo[°C]	T_eq[°C]
01/05/2023 0:00	23,5	0	9,317	18,8
01/05/2023 0:10	23	0	9,018	18,6
01/05/2023 0:20	23	0	8,720	18,3
01/05/2023 0:30	22,95	0	8,421	18,1
01/05/2023 0:40	23	0	8,122	17,9
01/05/2023 0:50	23	0	7,823	17,7
01/05/2023 1:00	22,4	0	7,525	17,4
01/05/2023 1:10	22	0	7,290	17,3
01/05/2023 1:20	22	0	7,056	17,1
01/05/2023 1:30	21,9	0	6,822	16,9
01/05/2023 1:40	22	0	6,588	16,7
01/05/2023 1:50	22	0	6,354	16,5
01/05/2023 2:00	21,4	0	6,120	16,3
01/05/2023 2:10	21,25	0	5,932	16,1
01/05/2023 2:20	21,1	0	5,744	16,0
01/05/2023 2:30	20,95	0	5,556	15,8
01/05/2023 2:40	20,8	0	5,368	15,7
01/05/2023 2:50	20,65	0	5,179	15,5
01/05/2023 3:00	20,5	0	4,991	15,3
01/05/2023 3:10	21	0	5,097	15,4
01/05/2023 3:20	21	0	5,203	15,6
01/05/2023 3:30	20,85	0	5,309	15,7
01/05/2023 3:40	21	0	5,414	15,8
01/05/2023 3:50	21	0	5,520	15,9
01/05/2023 4:00	21,2	0	5,626	16,0
01/05/2023 4:10	21	0	5,755	16,2
01/05/2023 4:20	22	0	5,884	16,3
01/05/2023 4:30	21,7	0	6,013	16,5
01/05/2023 4:40	22	0	6,142	16,6
01/05/2023 4:50	22	0	6,271	16,8
01/05/2023 5:00	22,2	0	6,400	16,9
01/05/2023 5:10	22	0,166666667	6,361	16,9
01/05/2023 5:20	22	0,333333333	6,323	16,9
01/05/2023 5:30	22,1	0,5	6,284	16,8
01/05/2023 5:40	22	0,666666667	6,246	16,8
01/05/2023 5:50	22	0,833333333	6,207	16,8
01/05/2023 6:00	22	1	6,169	16,7
01/05/2023 6:10	22	15,5	6,578	17,1
01/05/2023 6:20	23	30	6,986	17,6
01/05/2023 6:30	23,3	44,5	7,395	18,0
01/05/2023 6:40	24	59	7,804	18,4
01/05/2023 6:50	24	73,5	8,213	18,8
01/05/2023 7:00	24,6	88	8,622	19,3
01/05/2023 7:10	25	121,5	9,184	19,9
01/05/2023 7:20	26	155	9,746	20,4
01/05/2023 7:30	26,35	188,5	10,309	21,0
01/05/2023 7:40	27	222	10,871	21,6

Figura 28: Datos climáticos. Fuente: Grupo termotecnia

- La temperatura equivalente se calcula utilizando la siguiente ecuación, donde h_c y h_r tienen valores de 10 y 5, respectivamente:

$$T_{eq} = \frac{h_c \cdot T_{aire} + h_r \cdot T_{cielo}}{h_r + h_c} \quad (0-1)$$

- La temperatura sol-aire (T_{sa}) se calcula mediante la siguiente ecuación, variando la absorptividad (α):

$$T_{sa} = T_{eq} + \frac{\alpha \cdot Radiation}{h_r + h_c} \quad (0-2)$$

ANEXO C: ELECCIÓN DEL DÍA TIPO DE CADA MES DE VERANO

A continuación, se presentan las gráficas de radiación frente a los días de cada mes de verano, utilizadas para seleccionar un día representativo de cada mes:

- Radiación en el mes de Mayo:

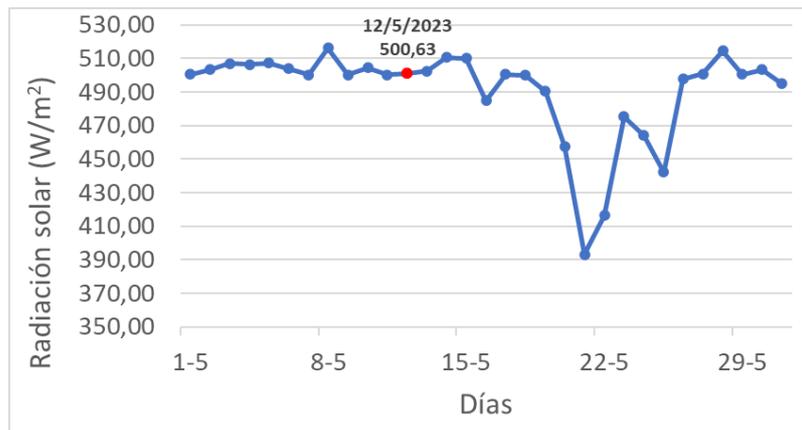


Figura 29: Día tipo de mayo. Fuente: Elaboración propia

- Radiación en el mes de Junio:

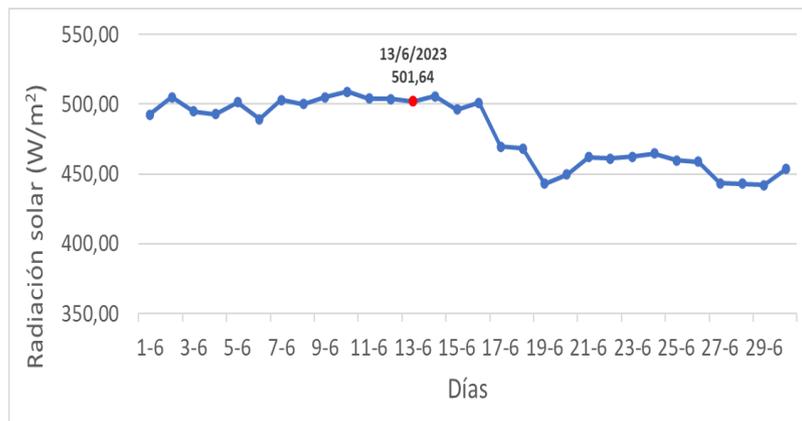


Figura 30: Día tipo de junio. Fuente: Elaboración propia

- Radiación en el mes de Julio:

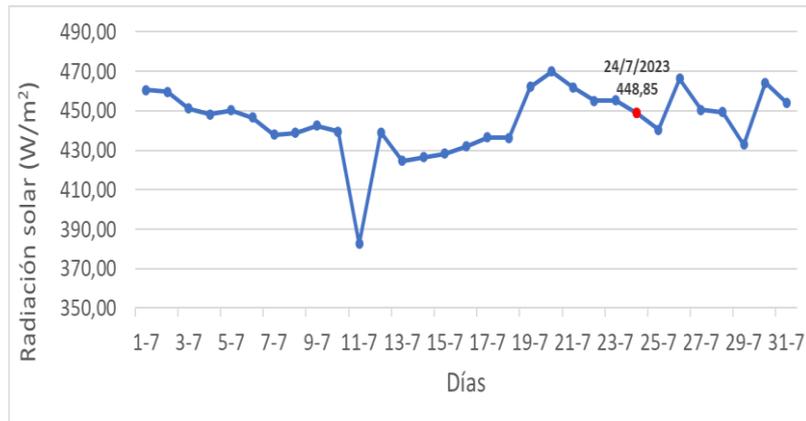


Figura 31: Día tipo de julio. Fuente: Elaboración propia

- Radiación en el mes de Agosto:

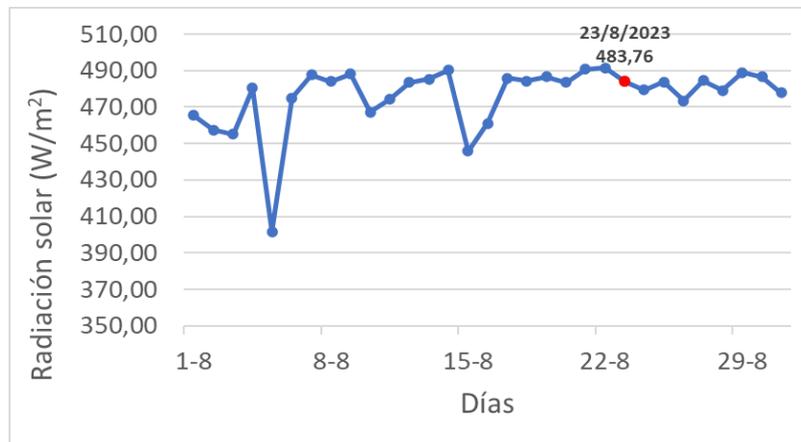


Figura 32: Día tipo de agosto. Fuente: Elaboración propia

- Radiación en el mes de Septiembre:

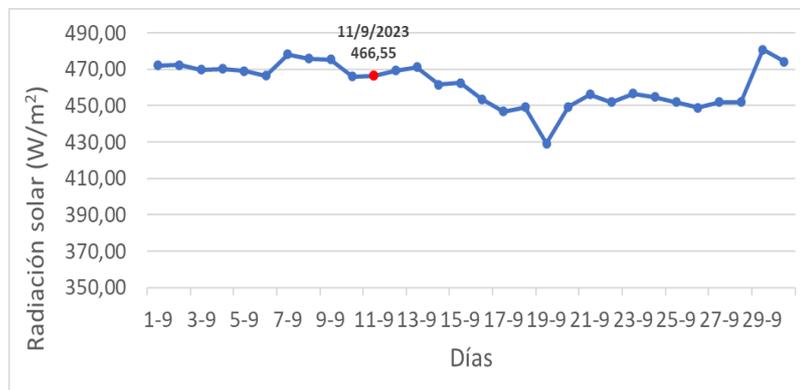


Figura 33: Día tipo de septiembre. Fuente: Elaboración propia

- Radiación en el mes de Octubre:

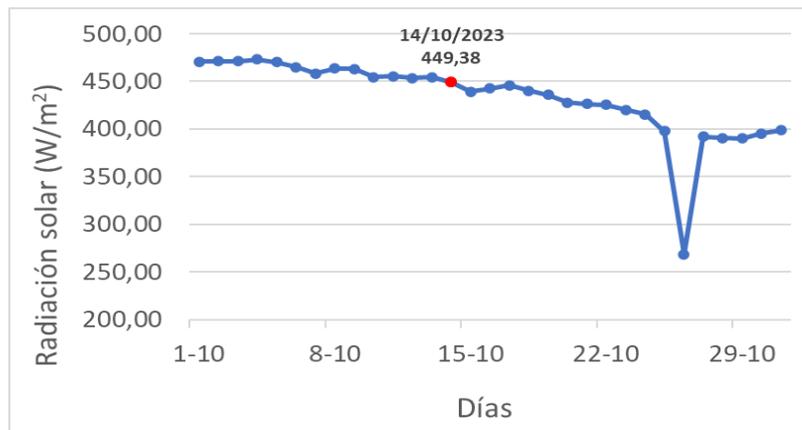


Figura 34: Día tipo de octubre. Fuente: Elaboración propia

ANEXO D: SIMULADOR DE CASOS PARA EL ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD INICIAL

Para facilitar la comprensión del proceso mediante el cual se obtuvieron los resultados de nuestro estudio, se incluye un fragmento representativo de los datos proporcionados en Excel junto con los resultados obtenidos.

- Se proporcionan los datos de las propiedades de los materiales, con un total de 240 combinaciones posibles:

Casos	Espesor	conductividad	Densidad	Cp	ha	alfa	hw	Tw
Caso 1	0,06	1,4	1800	940	15	0,4	30	28
Caso 2	0,06	1,4	1800	940	15	0,4	30	29
Caso 3	0,06	1,4	1800	940	15	0,4	30	30
Caso 4	0,06	1,4	1800	940	15	0,4	30	31
Caso 5	0,06	1,4	1800	940	15	0,4	30	32
Caso 6	0,06	1,4	1800	940	15	0,55	30	28
Caso 7	0,06	1,4	1800	940	15	0,55	30	29
Caso 8	0,06	1,4	1800	940	15	0,55	30	30
Caso 9	0,06	1,4	1800	940	15	0,55	30	31
Caso 10	0,06	1,4	1800	940	15	0,55	30	32
Caso 11	0,06	1,4	1800	940	15	0,4	0	28
Caso 12	0,06	1,4	1800	940	15	0,4	0	29
Caso 13	0,06	1,4	1800	940	15	0,4	0	30
Caso 14	0,06	1,4	1800	940	15	0,4	0	31
Caso 15	0,06	1,4	1800	940	15	0,4	0	32
Caso 16	0,06	1,4	1800	940	15	0,55	0	28
Caso 17	0,06	1,4	1800	940	15	0,55	0	29
Caso 18	0,06	1,4	1800	940	15	0,55	0	30
Caso 19	0,06	1,4	1800	940	15	0,55	0	31
Caso 20	0,06	1,4	1800	940	15	0,55	0	32
Caso 21	0,08	1,4	1800	940	15	0,4	30	28
Caso 22	0,08	1,4	1800	940	15	0,4	30	29
Caso 23	0,08	1,4	1800	940	15	0,4	30	30
Caso 24	0,08	1,4	1800	940	15	0,4	30	31
Caso 25	0,08	1,4	1800	940	15	0,4	30	32
Caso 26	0,08	1,4	1800	940	15	0,55	30	28
Caso 27	0,08	1,4	1800	940	15	0,55	30	29
Caso 28	0,08	1,4	1800	940	15	0,55	30	30
Caso 29	0,08	1,4	1800	940	15	0,55	30	31
Caso 30	0,08	1,4	1800	940	15	0,55	30	32
Caso 31	0,08	1,4	1800	940	15	0,4	0	28
Caso 32	0,08	1,4	1800	940	15	0,4	0	29
Caso 33	0,08	1,4	1800	940	15	0,4	0	30
Caso 34	0,08	1,4	1800	940	15	0,4	0	31
Caso 35	0,08	1,4	1800	940	15	0,4	0	32
Caso 36	0,08	1,4	1800	940	15	0,55	0	28
Caso 37	0,08	1,4	1800	940	15	0,55	0	29
Caso 38	0,08	1,4	1800	940	15	0,55	0	30
Caso 39	0,08	1,4	1800	940	15	0,55	0	31
Caso 40	0,08	1,4	1800	940	15	0,55	0	32
Caso 41	0,1	1,4	1800	940	15	0,4	30	28
Caso 42	0,1	1,4	1800	940	15	0,4	30	29
Caso 43	0,1	1,4	1800	940	15	0,4	30	30
Caso 44	0,1	1,4	1800	940	15	0,4	30	31
Caso 45	0,1	1,4	1800	940	15	0,4	30	32
Caso 46	0,1	1,4	1800	940	15	0,55	30	28
Caso 47	0,1	1,4	1800	940	15	0,55	30	29
Caso 48	0,1	1,4	1800	940	15	0,55	30	30
Caso 49	0,1	1,4	1800	940	15	0,55	30	31
Caso 50	0,1	1,4	1800	940	15	0,55	30	32

Figura 35: Propiedades del material. Fuente: Grupo termotecnia

- Simulador de casos:

pass muro		Teq	rad	Tsa [°C]	Tw [°C]	ha [W/m²K]	hw [W/m²K]
Numero de filas simuladas	26497	18,772343	0	18,772343	32	15	0
Numero de filas creadas	26497	18,772343	0	18,772343	32	15	0
alfa simulada	0,55	18,550537	0	18,550537	32	15	0
Conductividad simulada	1,7	18,328731	0	18,328731	32	15	0
ha Simulado	15	18,106924	0	18,106924	32	15	0
hw simulado	0	17,885118	0	17,885118	32	15	0
Tw simulado	32	17,663311	0	17,663311	32	15	0
		17,441505	0	17,441505	32	15	0
		17,252361	0	17,252361	32	15	0
		17,063217	0	17,063217	32	15	0
		16,874074	0	16,874074	32	15	0
		16,68493	0	16,68493	32	15	0
		16,495786	0	16,495786	32	15	0
		16,306643	0	16,306643	32	15	0
		16,143944	0	16,143944	32	15	0
		15,981245	0	15,981245	32	15	0
		15,818546	0	15,818546	32	15	0
		15,655847	0	15,655847	32	15	0
		15,493149	0	15,493149	32	15	0
		15,33045	0	15,33045	32	15	0
		15,44349	0	15,44349	32	15	0
		15,55653	0	15,55653	32	15	0
		15,66957	0	15,66957	32	15	0
		15,782611	0	15,782611	32	15	0
		15,895651	0	15,895651	32	15	0
		16,008691	0	16,008691	32	15	0
		16,162801	0	16,162801	32	15	0
		16,316911	0	16,316911	32	15	0
		16,471021	0	16,471021	32	15	0
		16,625132	0	16,625132	32	15	0
		16,779242	0	16,779242	32	15	0
		16,933352	0	16,933352	32	15	0
		16,898275	0,166666667	16,904386	32	15	0
		16,863198	0,333333333	16,87542	32	15	0
		16,828121	0,5	16,846454	32	15	0
		16,793043	0,666666667	16,817488	32	15	0
		16,757966	0,833333333	16,788522	32	15	0
		16,722889	1	16,759556	32	15	0
		17,14808	15,5	17,716413	32	15	0
		17,573271	30	18,673271	32	15	0
		17,998462	44,5	19,630128	32	15	0
		18,423653	59	20,586986	32	15	0
		18,848843	73,5	21,543843	32	15	0
		19,274034	88	22,500701	32	15	0
		19,850318	121,5	24,305318	32	15	0
		20,426602	155	26,109935	32	15	0
		21,002885	188,5	27,914552	32	15	0
		21,579169	222	29,719169	32	15	0
		22,155453	255,5	31,523786	32	15	0

Figura 36: Simulador de casos. Fuente: Grupo termotecnia

- Resultados obtenidos de las simulaciones, sumando un total de 240 resultados obtenidos:

Casos1	Casos2	Casos3	Casos4	Casos5	Casos6	Casos7	Casos8	Casos9	Casos10	Casos11	Casos12	Casos13	Casos14	Casos15
24,233	24,233	24,233	24,233	24,233	24,233	24,233	24,233	24,233	24,233	24,233	24,233	24,233	24,233	24,233
22,039	22,039	22,039	22,039	22,039	22,039	22,039	22,039	22,039	22,039	22,039	22,039	22,039	22,039	22,039
20,608	20,608	20,608	20,608	20,608	20,608	20,608	20,608	20,608	20,608	20,608	20,608	20,608	20,608	20,608
19,646	19,646	19,646	19,646	19,646	19,646	19,646	19,646	19,646	19,646	19,646	19,646	19,646	19,646	19,646
18,971	18,971	18,971	18,971	18,971	18,971	18,971	18,971	18,971	18,971	18,971	18,971	18,971	18,971	18,971
18,472	18,472	18,472	18,472	18,472	18,472	18,472	18,472	18,472	18,472	18,472	18,472	18,472	18,472	18,472
18,080	18,080	18,080	18,080	18,080	18,080	18,080	18,080	18,080	18,080	18,080	18,080	18,080	18,080	18,080
17,765	17,765	17,765	17,765	17,765	17,765	17,765	17,765	17,765	17,765	17,765	17,765	17,765	17,765	17,765
17,499	17,499	17,499	17,499	17,499	17,499	17,499	17,499	17,499	17,499	17,499	17,499	17,499	17,499	17,499
17,263	17,263	17,263	17,263	17,263	17,263	17,263	17,263	17,263	17,263	17,263	17,263	17,263	17,263	17,263
17,045	17,045	17,045	17,045	17,045	17,045	17,045	17,045	17,045	17,045	17,045	17,045	17,045	17,045	17,045
16,839	16,839	16,839	16,839	16,839	16,839	16,839	16,839	16,839	16,839	16,839	16,839	16,839	16,839	16,839
16,639	16,639	16,639	16,639	16,639	16,639	16,639	16,639	16,639	16,639	16,639	16,639	16,639	16,639	16,639
16,452	16,452	16,452	16,452	16,452	16,452	16,452	16,452	16,452	16,452	16,452	16,452	16,452	16,452	16,452
16,275	16,275	16,275	16,275	16,275	16,275	16,275	16,275	16,275	16,275	16,275	16,275	16,275	16,275	16,275
16,104	16,104	16,104	16,104	16,104	16,104	16,104	16,104	16,104	16,104	16,104	16,104	16,104	16,104	16,104
15,935	15,935	15,935	15,935	15,935	15,935	15,935	15,935	15,935	15,935	15,935	15,935	15,935	15,935	15,935
15,769	15,769	15,769	15,769	15,769	15,769	15,769	15,769	15,769	15,769	15,769	15,769	15,769	15,769	15,769
15,605	15,605	15,605	15,605	15,605	15,605	15,605	15,605	15,605	15,605	15,605	15,605	15,605	15,605	15,605
15,536	15,536	15,536	15,536	15,536	15,536	15,536	15,536	15,536	15,536	15,536	15,536	15,536	15,536	15,536
15,540	15,540	15,540	15,540	15,540	15,540	15,540	15,540	15,540	15,540	15,540	15,540	15,540	15,540	15,540
15,587	15,587	15,587	15,587	15,587	15,587	15,587	15,587	15,587	15,587	15,587	15,587	15,587	15,587	15,587
15,659	15,659	15,659	15,659	15,659	15,659	15,659	15,659	15,659	15,659	15,659	15,659	15,659	15,659	15,659
15,747	15,747	15,747	15,747	15,747	15,747	15,747	15,747	15,747	15,747	15,747	15,747	15,747	15,747	15,747
15,845	15,845	15,845	15,845	15,845	15,845	15,845	15,845	15,845	15,845	15,845	15,845	15,845	15,845	15,845
15,962	15,962	15,962	15,962	15,962	15,962	15,962	15,962	15,962	15,962	15,962	15,962	15,962	15,962	15,962
16,095	16,095	16,095	16,095	16,095	16,095	16,095	16,095	16,095	16,095	16,095	16,095	16,095	16,095	16,095
16,235	16,235	16,235	16,235	16,235	16,235	16,235	16,235	16,235	16,235	16,235	16,235	16,235	16,235	16,235
16,381	16,381	16,381	16,381	16,381	16,381	16,381	16,381	16,381	16,381	16,381	16,381	16,381	16,381	16,381
16,530	16,530	16,530	16,530	16,530	16,530	16,530	16,530	16,530	16,530	16,530	16,530	16,530	16,530	16,530

Figura 37: Resultados simulador. Fuente: Elaboración propia