



**POLITECNICO DE BARI Y UNIVERSIDAD DE SEVILLA
– ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA DE
EDIFICACIÓN (ETSIE)**

**MÁSTER UNIVERSITARIO EN GESTIÓN INTEGRAL DE LA
EDIFICACIÓN**

**TRABAJO FIN DE MÁSTER EN
CONSTRUCCIÓN BIOCLIMÁTICA Y BIOCONSTRUCCIÓN**

**ESTUDIO DE MATERIALES TERMOCRÓMICOS
INNOVADORES. ANÁLISIS DE MITIGACIÓN DE LA
ISLA DE CALOR URBANO**

**Study of Innovative Thermochromic Materials. Analysis of Urban Heat
Island Mitigation**

Tutor:

Prof. Jacinto Enrique CANIVELL GARCÍA DE PAREDES

Cotutor:

Prof. Ing. Francesco FIORITO

Don:

Michele SPALIERNO

Año Académico 2020-2021

INDICE

1. Introducción y justificación de tema	1
2. Descripción de los conceptos generales	3
2.1 Isla de calor urbano	3
2.1.1 El fenómeno	3
2.2 Clasificación de la isla de calor urbano	7
2.2.1 Isla de calor atmosférica	7
2.2.2 Isla de calor superficial	9
2.3 Causas y posibles consecuencias	11
2.3.1 Estructura urbana	13
2.3.2 Edificios	16
2.3.3 Componente humano	18
2.3.4 Contexto ambiental	18
2.4 Las consecuencias de la isla de calor urbano	19
2.5 Técnicas de mitigación	20
2.5.1 Áreas verdes	21
2.5.2 Albedo	21
2.5.3 Cargas antropogénicas	22
2.5.4 Materiales de construcción	23
2.6 Materiales innovadores	24
3. Materiales inteligentes	26
3.1 Generalidades y clasificación	26
3.1.1 Materiales fotocromáticos	30
3.1.2 Materiales electrocrómicos	31
3.1.3 LCD	33
3.1.4 Materiales cromáticos de gas	34
3.1.5 Materiales mecano crómicos	35
3.1.6 Materiales termocrómicos	35

3.1.7	PCM	37
4.	Objetivos	41
5.	Metodologia	43
6.	Estado de la cuestión	47
6.1	La isla de calor urbano	47
6.2	Las consecuencias de la isla de calor urbano	48
6.2.1	Cargas antropogénicas	49
6.3	Materiales de construcción	50
6.4	Materiales inteligentes	51
6.4.1	Termocrómicos	51
7.	Software utilizado	54
7.1	Envi-met	54
7.1.1	Información de entrada	55
7.1.2	Interfaz de simulación	57
7.1.3	Archivo de output	58
7.1.4	Herramientas para leer las salidas	59
7.1.5	Limitaciones de software	60
7.2	El caso de estudio	62
7.2.1	Modelado en Envi-met	62
7.2.2	Elección de materiales y vegetación	69
7.2.3	Simulaciones	73
7.3	Estructura de los análisis	76
8.	Análisis de los resultados	78
8.1	Análisis del caso base de referencia	79
8.1.1	Análisis del 20/12 a las 06	79
8.1.2	Análisis del 20/12 a las 15	83
8.1.3	Análisis del 25/07 a las 06	84
8.1.4	Análisis del 25/07 a las 15	87
8.2	Comparación con materiales termocrómicos	90

8.2.1	Comparación de resultados de 20-12 a las 06	91
8.2.2	Comparación de resultados de 20-12 a las 15	95
8.2.3	Comparación de resultados de 25-07 a las 06	99
8.2.4	Comparación de resultados de 25-07 a las 15	104
9.	Conclusiones	108
10.	Desarrollos futuros	111
	Referencias	112
	Webgrafia	119

1. Introducción y justificación de tema

Objetivo de esta tesis es el estudio de los efectos de la isla de calor urbano, evaluando las consecuencias para la estructura urbana. Tras analizar que entre los principales responsables del origen de este fenómeno se encuentran los materiales utilizados tradicionalmente en la construcción, se ha prestado atención a los que pueden definirse como materiales cromogénicos. Estudiadas las consecuencias de su utilización, se ha considerado interesante profundizar el análisis de uno de los subgrupos de esta familia, es decir, los materiales termocrómicos. El trabajo tiene como objetivo evaluar cuáles pueden ser los beneficios que el uso de materiales termocrómicos tendría dentro del contexto urbano. Además, un mayor confort térmico permitiría una disminución de la demanda energética de los apartamentos debido al uso de los sistemas mecánicos de calefacción, es decir, los acondicionadores de aire.

El efecto "isla de calor urbano" (Urban Heat Island, desde aquí UHI) puede considerarse como consecuencia directa de una elevada urbanización, es decir, el desplazamiento de un número cada vez mayor de familias hacia el centro urbano, buscando un estilo de vida mejor o más cercano al lugar de trabajo. Esta migración implica la construcción de nuevos edificios, carreteras, infraestructuras y redes de transporte ferroviario, que contribuyen sustancialmente a la formación y, sobre todo, al aumento de la UHI, que ya está demasiado extendida a nivel mundial. Las nuevas construcciones que acaban de enumerarse producen un doble efecto negativo: el primero es que eliminan suelos disponibles de otro modo para la realización de espacios verdes, con los beneficios que ello implica; el segundo se refiere a la excesiva concentración de edificios que no permite una eficaz circulación del aire, provocando el nacimiento de lo que se denomina, precisamente, isla de calor urbano, es decir, zonas de la ciudad, o incluso ciudades enteras, donde el calor, y por lo tanto la temperatura del aire, alcanza una intensidad muy elevada. El aumento de la temperatura está relacionado con las temperaturas

máximas de verano y las mínimas invernales, que, debido a este fenómeno, tienden a aumentar hasta una media de 3 °C, con consecuencias para ambas estaciones. La UHI urbano produce sus efectos con mayor intensidad sobre todo durante la noche, cuando el calor absorbido durante el día por los materiales poco reflectantes (con bajo albedo) se dispersa en el ambiente y se refleja y absorbe de nuevo.

Además de la construcción de nuevas obras en una porción cada vez más amplia de territorio, un elemento muy importante que contribuye al aumento de la temperatura media del aire es sin duda el tipo de material que se utiliza en los edificios, especialmente aquellos construidos en épocas menos recientes. En efecto, estos materiales se caracterizan por un valor de reflectancia medio/bajo, y por lo tanto alto espectro de absorción de la radiación solar. La consecuencia directa es un almacenamiento excesivo de la radiación solar, que se libera a continuación en forma de energía térmica en el ambiente y en el interior de los apartamentos, con las consecuencias que veremos a continuación. El presente trabajo de tesis se configura como un intento de estudio de un tipo de material innovador capaz de modificar sus características en relación con la temperatura del aire, para favorecer tanto el comportamiento estival como el invernal.

2. Descripción de los conceptos generales

2.1 Isla de calor urbano

2.1.1 El fenómeno

La población, la transformación de los sistemas naturales en zonas antropizadas, los sistemas urbanos y, por consiguiente, el uso de la energía, han crecido durante demasiados años de forma incontrolada.

El sector de la construcción es conocido por ser uno de los principales responsables del consumo mundial de energía. En particular, al evaluar únicamente los datos relativos a la Unión Europea, resulta que el 40% del consumo de energía se debe al sector de la construcción, que produce el 36 % de las emisiones de CO₂ de su ciclo de vida total, que incluye la extracción y transformación de materias primas, la construcción, la utilización (fase más costosa), renovación y demolición del edificio (https://ec.europa.eu/info/news/focus-energy-efficiency-buildings-2020-feb-17_it). Por lo tanto, es necesario cambiar el modo de diseño y avanzar hacia lo que se denomina "diseño sostenible". Esta definición se refiere a la capacidad de diseñar un edificio que sea capaz de encajar en el entorno natural en armonía con él, no resultando externo y perjudicial para el medio ambiente, sino también para la salud humana y para el confort interior y exterior. Es indispensable planificar el proyecto valorizando el contexto ambiental, manteniendo al mismo tiempo el objetivo de optimizar los recursos, favorecer las exigencias de confort del hombre y explotar las cualidades físico-naturales del lugar. Para ello, en los últimos años y hasta ahora, se han estudiado soluciones que aprovechen todos los parámetros que pueden influir en la armonía del paisaje y el confort interno, considerados fundamentales para mantener el objetivo de sostenibilidad. La radiación solar, junto con otros parámetros climáticos, al ser uno de los responsables indirectos del

calentamiento global, es probablemente uno de los parámetros que más influye en la configuración de un edificio.

De hecho, según su intensidad en el lugar de construcción y la orientación de sus radios, varían las modalidades constructivas. La primera decisión se refiere a la orientación del edificio, que, si se realiza de la manera adecuada junto con la colocación de las paredes verticales transparentes, permite aprovechar las técnicas de construcción pasivas, favoreciendo las aportaciones solares invernales y reduciéndolas en verano, garantizando una ventilación natural que permite un mayor confort interno, evitando siempre que sea posible el recurso a la climatización mecánica, tanto estival como invernal.

Otro parámetro que influye profundamente en el confort interno y la demanda de energía para calefacción o refrigeración es sin duda el tipo de tecnología y de aislamiento elegido para los cierres verticales opacos exteriores y para la cobertura, ya que son clave para establecer la absorción de la radiación solar. Este último aspecto es fundamental cuando hablamos de confort interno; los parámetros termo-físicos sobre los que actuar se refieren a la temperatura superficial y a la inercia térmica. Por lo que se refiere a la inercia térmica, este parámetro puede evaluarse mediante el desfase (capacidad de retrasar el efecto del flujo térmico debido a la radiación solar) y la atenuación (capacidad de reducir la magnitud de este efecto). En cuanto a la temperatura de la superficie, podemos decir que la temperatura que alcanza una envoltura opaca define la cantidad de calor que podrá entrar en el interior del edificio. Los criterios termo-físicos que definen sus propiedades son el coeficiente de absorción de la radiación solar, la emisividad y la reflectancia. La primera indica la capacidad del material para absorber la energía radiante que incide en la pared; la emisividad indica la aptitud del material para dispersar la energía radiante que incide en él, mientras que la reflectancia es la capacidad del material para reflejar la radiación solar. El presente documento tiene por objeto evaluar el impacto de los parámetros mencionados anteriormente determinando los efectos de una evaluación errónea de estos parámetros en la calefacción urbana y en la formación de la llamada isla de calor

El creciente nivel de urbanización que se está produciendo en el mundo, con la necesidad de metrópolis cada vez más grandes y, en consecuencia, necesidad de construir cada vez más edificios e infraestructuras, está estrechamente relacionado con el problema de la UHI urbano. El número de habitantes de las ciudades ha pasado de 600 millones en 1920 a 2000 millones en 1986, y si este crecimiento continúa, más de la mitad de la población mundial vivirá en ciudades a finales de este siglo. Hace cien años, sólo el 14% vivía en las ciudades y en 1950 menos del 30% de la población mundial estaba urbanizada. Actualmente, al menos 170 ciudades cuentan con más de un millón de habitantes cada una. Es evidente que las zonas urbanas sin una alta calidad climática utilizan más energía para la climatización estival y aún más electricidad para la iluminación. Además, el discomfort y la incomodidad para la población urbana debido a las altas temperaturas, los efectos del "túnel del viento" en las calles y las inusuales turbulencias del viento debidas a rascacielos mal diseñados son muy comunes (Santamouris et al., 2001).

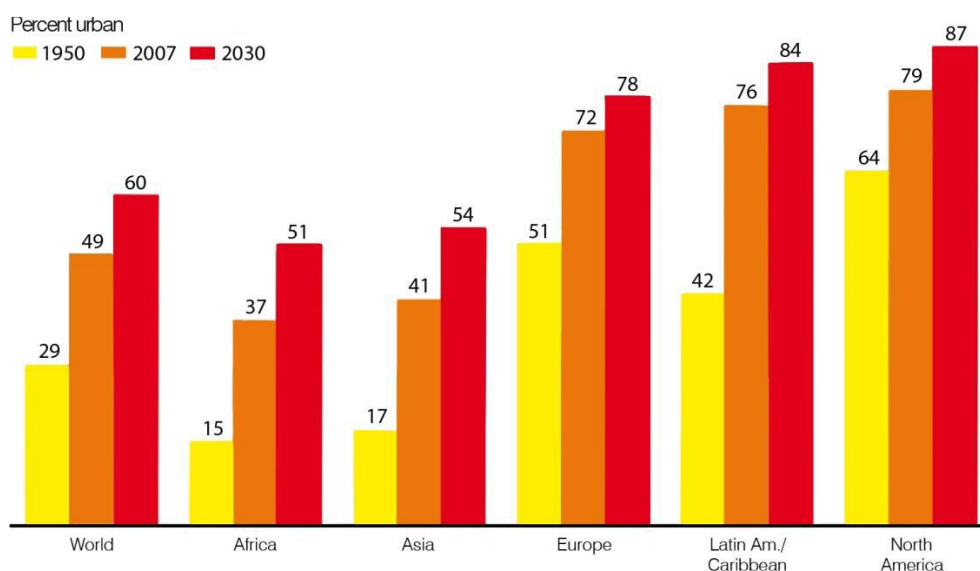


Figura 1 Tendencia de urbanización (fuente: United Nations, 2006)

La urbanización (Fig. 1) es el resultado del elevado crecimiento demográfico de la población mundial en las últimas décadas (el crecimiento demográfico ha dado lugar a un aumento de 4000 millones de personas en el último siglo);

el resultado de la adaptación a estas nuevas necesidades es el aumento del número de edificios por ciudad, la concentración de los mismos en zonas particulares con la consiguiente eliminación de los espacios verdes, sustituidos por porciones antropizadas, e intensificación del consumo de energía y del microclima urbano. En los últimos años nace, pues, la preocupación por la UHI, nombre que se da al fenómeno que encierra las consecuencias de los comportamientos exasperados y a menudo equivocados del hombre.

La UHI es un fenómeno de alteración térmica que afecta a las aglomeraciones urbanas, causando un cambio térmico, a veces evidente, entre las ciudades y las zonas rurales circundantes.

La primera observación de este efecto tuvo lugar en 1818 por el meteorólogo Luke Howard, en Londres. Para encontrar, sin embargo, por primera vez, la nomenclatura de UHI hay que esperar el artículo de Gordon Manley en el *Quarterly journal of the Royal Meteorology Society* de 1958. El nombre se deriva de una asociación gráfica entre la cartografía de las isothermas relativas a la temperatura del aire y una isla en el mar. En efecto, resultó que las zonas rurales circundantes eran más frescas, por lo tanto, con una isoterma diferente de las zonas más centrales y concentradas del centro de la ciudad, y parecían representar el "mar" en el que navegaban las isothermas más centrales y condensadas de las zonas urbanas, que representaban la "isla de calor urbano".

Sobre la base de lo anterior, es fácil imaginar que la UHI no es uniforme, sino que varía dentro de la misma ciudad en función de la concentración de edificios, características de las superficies que componen la zona y también en función del tipo de suelo natural o artificial presente. Para evaluar estas diferencias existe un indicador que mide su intensidad (UHII-UHI intensity) definida como la diferencia entre la temperatura urbana y la de las zonas limítrofes. La UHI varía en función de tantos aspectos como las condiciones atmosféricas, la temporada y los momentos del día. Para tener una idea de la magnitud del fenómeno, se ha estudiado que en una ciudad con un millón de habitantes existe una variación media anual de la temperatura de 1-3 °C de

los centros urbanos con respecto a las zonas limítrofes, mientras que considerado el peor de los casos, la intensidad máxima alcanzada es de 12 °C (Oke, T.R., 1987).

2.2 Clasificación de la isla de calor urbano

La UHI se ha dividido según el origen, las técnicas de medición y las dinámicas temporales, su impacto ambiental y las técnicas de mitigación disponibles. En detalle, el fenómeno puede dividirse en dos tipos diferentes:

- Isla de calor atmosférico (atmospheric UHI)
- Isla de calor superficial (surface UHI)

La UHI es un fenómeno que ve en la antropización la causa principal de su nacimiento y existencia; sin embargo, no hay que olvidar la contribución del tiempo meteorológico. De hecho, en un día muy nublado, la intensidad de la radiación solar se reduce mucho, disminuyendo los efectos de los elementos urbanos sobre la temperatura; por el contrario, en un día soleado y con poco viento, el efecto isla de calor se percibirá con mayor intensidad. El papel del viento no es despreciable porque es capaz de transportar aire fresco desde las zonas periféricas hasta el centro de la ciudad, refrescando esta zona y disminuyendo la percepción del calor debido a la UHI.

2.2.1 Isla de calor atmosférica

La isla de calor atmosférico viene determinada por la diferencia de temperatura del aire entre los centros urbanos densamente poblados y las zonas periféricas circundantes, que resultan ser perceptiblemente más frescas.

Los estudios anteriores han dividido la isla de calor atmosférico en función de la altitud analizada, obteniendo así:

- Isla de calor de la capa de cubierta urbana (urban dosel layer UCL) dictado por la diferencia de temperatura del aire cerca de la superficie, por debajo de la altura media de los edificios
- Isla de calor de la capa límite urbana (urban boundary layer UBL) derivada de la diferencia de temperatura del aire por encima de la altura media de los edificios, hasta el punto en que las características y la conformación urbana dejen de influir en las características atmosféricas.

Para conocer mejor el fenómeno de la isla de calor es necesario estudiar sus características, estructura y mecanismos físicos. La presencia de un centro urbano puede modificar la temperatura, la humedad del aire y los regímenes de circulación del viento. La estructura urbana puede afectar más al clima local que el calentamiento global.

El urban boundary layer es el volumen atmosférico dentro del cual se producen las alteraciones climáticas. Su altura varía desde unas pocas decenas de metros con respecto a la línea de tierra hasta un máximo de 2000 metros. Dentro de este volumen atmosférico se desarrolla la urban surface layer, la capa con mayores emisiones de calor debido al sobrecalentamiento derivado de la concentración de la construcción. El último agente definido como responsable del sobrecalentamiento es el urban dosel layer, es decir, aquella porción de espacio realmente ocupada por los edificios (por lo tanto, es una capa que va desde la línea de tierra hasta la altura de los mismos edificios) (Fig. 2). En este espacio los habitantes perciben de manera más intensa la presencia de la "campana" de calor. La temperatura se medirá a una temperatura igual a la de las personas o, en cualquier caso, a un máximo de 3 m por encima del suelo; en comparación con la temperatura de las zonas rurales circundantes medida a la misma altura, solo se detectará la presencia de CLUHI si las dos mediciones dan valores diferentes.

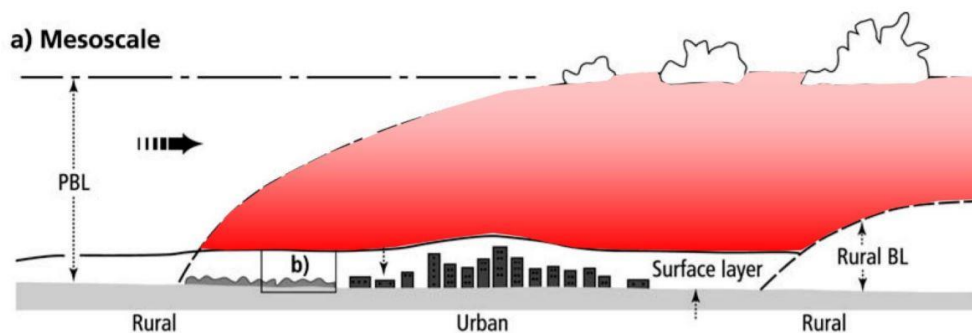


Figura 2 Fuente: Voogt, J. (2007). *How Researchers Measure Urban Heat Islands*. Department of Geography, 34. Retrieved from http://epa.gov/heatisland/resources/pdf/EPA_How_to_measure_a_UHI.pdf

La isla de calor atmosférico, a diferencia de la superficial, se intensifica a partir de la tarde hasta alcanzar la máxima intensidad por la noche, mientras que es más suave durante el día. También ella es obviamente más intensa en días claros y con poco viento. La variación de temperatura derivada de la presencia de la isla de calor atmosférico en las grandes ciudades, sobre una base anual, está comprendida entre 1° y 3° C. El pico de intensidad del fenómeno que puede alcanzarse es de 10°C. Las técnicas de medición directa asociadas a la isla de calor atmosférico son los termómetros tradicionales de posición fija (torres y globos de sonda) o de posición móvil (aviones, automóviles); también existe una técnica de medición indirecta mediante el uso de sodar, o un instrumento meteorológico que pueda detectar las ondas sonoras difusas y reflejadas por las turbulencias atmosféricas, utilizado para medir el perfil de temperatura vertical a varias alturas por encima del nivel del suelo gracias a las ondas sonoras.

2.2.2 Isla de calor superficial

La insuficiencia o a menudo la total falta de vegetación es una de las causas del aumento de la temperatura en la ciudad. Esta correlación entre calor y vegetación es el hecho de que, en el caso de un día de verano con cielo claro, la radiación solar es muy fuerte en la zona urbana, ya que no encuentra las

nubes que obstaculizan su paso. Por lo tanto, los rayos solares llegan a su máxima intensidad irradiando cualquier superficie no sombreada, especialmente las superficies horizontales urbanas (Fig.3). En una ciudad fuertemente antropizada, como lo son ahora todas las grandes metrópolis, pero también las que no se consideran metrópolis sino "solo" ciudades, la mayoría de las superficies horizontales están cementadas o tienen un bajo contenido de agua. Es muy importante el contenido de agua por debajo de la superficie ya que, aprovechando el proceso de evapotranspiración, se reduce el efecto isla de calor. La evapotranspiración es un proceso mediante el cual el agua permite bajar la temperatura, ya que utiliza el calor del aire para la evaporación. Las temperaturas de las zonas con alto contenido de agua (parques, campos, zonas verdes y zonas sombreadas) tienen una temperatura del aire muy similar a la del aire situado encima, a diferencia de las zonas antropizadas que alcanzan temperaturas muy superiores a la temperatura del aire, hasta 50 °C (Berdahl, P. & Bretz, S.,1997). En el caso de las cubiertas, las realizadas en asfalto negro pueden alcanzar una temperatura de 85 °C, lo que, sin embargo, es raro debido a diversos factores, como el grado de exposición solar, la inclinación, las condiciones atmosféricas y las propiedades de los diferentes materiales.

Por supuesto, hay una diferencia entre la isla de calor de la superficie diurna y la que se desarrolla por la noche. La diferencia de temperatura llamada epidérmica es mayor durante las horas con presencia solar: de hecho, el T epidérmico alcanza valores medios de aproximadamente 10-15 °C, mientras que durante la noche no supera los 5-10 °C (Voogt, J.A. & Oke T.R., 2003).

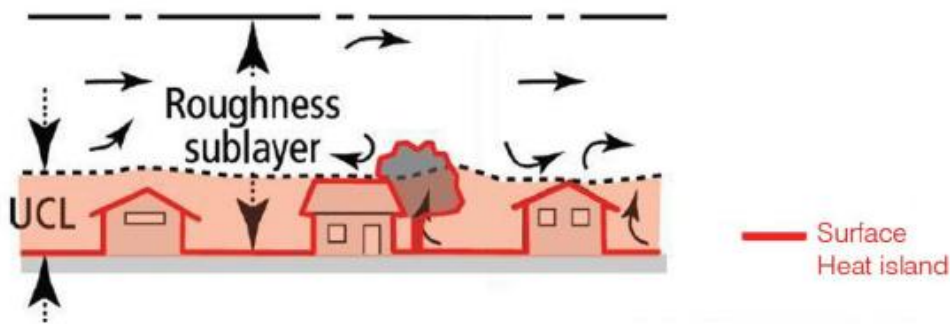


Figura 3 Thermal Remote Sensing of Urban Areas”, Remote Sensing of (beretta voogt)

Para evaluar este tipo de isla de calor se utiliza la teledetección térmica que permite obtener información en la sub-banda de infrarrojos térmicos. El TRS (Thermal Remote Sensing) permite medir la cantidad de radiación electromagnética emitida por la superficie terrestre en las longitudes de onda que pertenecen a la región del infrarrojo térmico. Dependiendo de la altitud e inclinación de los sensores, estos sensores pueden detectar temperaturas en tejados, carreteras, aparcamientos (sensores a gran altura) o incluso paredes de edificios (sensores más bajos). Las tecnologías de teledetección GIS, que se pueden implementar, permiten obtener una imagen más completa de la estructura urbana en relación con los cambios de temperatura a medida que nos alejamos de las zonas verdes. La imagen que nos devuelve la teledetección, la termografía, permite asociar un pixel a un nivel de temperatura específico.

En conclusión, es posible afirmar que la isla de calor de superficie es variable según el momento del día y del año, resultando ser más intenso en verano que las otras estaciones: la intensidad de los rayos solares y la menor presencia de nubes facilitan el fenómeno en esta época del año.

2.3 Causas y posibles consecuencias

La UHI es un fenómeno que fue estudiado por primera vez en la primera mitad de 1800 y se debe principalmente a la enorme expansión industrial que se produjo en ese período. Entre los efectos de la revolución industrial que se desarrolló se encuentra el notable aumento de las fábricas y de sus máquinas utilizadas aquí, seguido de la necesidad de una gran parte de la población de trasladarse a las ciudades o a zonas limítrofes, con el fin no sólo de estar más cerca de los lugares de trabajo, sino también de obtener mejores condiciones de vida. El proceso de industrialización vivido a partir de 1800 ha llevado a emisiones cada vez mayores de CO₂ y gases contaminantes, aumentando cada vez más hasta finales del siglo pasado, Cuando se tuvo en cuenta el cambio climático y los graves problemas a los que se enfrentaba, se inició un lento proceso de sensibilización sobre el problema climático. Según algunos

estudios, el sector de la construcción es uno de los principales productores de gases de efecto invernadero, lo que contribuye sustancialmente al calentamiento global. Al parecer, los edificios son inadecuados para satisfacer las necesidades de la población y, al mismo tiempo, las políticas de sostenibilidad del Gobierno. El modus operandi de los constructores hasta los últimos años del siglo XX ha vivido una normalización de los tipos de construcción, gracias a la llegada de acero y hormigón armado, y preveía la satisfacción de las necesidades y del confort térmico a través del uso incontrolado de las instalaciones, únicos poseedores del control del microclima indoor. En este contexto, hay que señalar que ya no se hace referencia a las condiciones climáticas locales para definir las características de las viviendas (p. ej., techos de nieve en lugares nevados o zonas en las que es necesario garantizar un buen nivel de inercia térmica) obteniendo edificios casi idénticos en lugares con diferentes entornos climáticos. El cambio climático que se ha producido ha puesto de manifiesto la inadecuación de las tecnologías constructivas de los edificios del pasado, diseñadas para condiciones ambientales muy diferentes.

Teniendo en cuenta los efectos descritos anteriormente a escala urbana, se observa que la interacción de los fenómenos naturales (radiación solar) y factores antropogénicos (urbanización, contaminación, etc.), favorecen la formación de un microclima urbano diferente de las zonas rurales, va a definir lo que se llama la isla de calor urbano. Ir a resumir los factores que afectan a la isla de calor se obtiene la siguiente distinción:

- Estructura urbana: densidad y altura de los edificios, anchura de las carreteras, presencia de vegetación y agua, arbolado de carreteras.
- Edificios: revestimientos, capacidad térmica de los cierres, emisividad de los materiales
- Componente humano: componente antropogénico, tráfico urbano, presencia de industrias

- Entorno medioambiental: lugar, irradiación, dirección y velocidad del viento, proximidad al mar o lagos

2.3.1 Estructura urbana

Una contribución importante al desarrollo de la UHI ha sido el crecimiento exponencial de la urbanización de las ciudades a lo largo de los años, yendo a formar verdaderas megalópolis. La magnitud de estos desplazamientos es difícil de controlar; lo que podría haberse hecho de forma metódica y organizada es, sin duda, la planificación urbana. En la búsqueda de un medio ambiente urbano más eficiente, eficaz y que respondiera inmediatamente a las demandas de la población, sólo se ha prestado atención a la resolución de los problemas que se plantean a corto plazo, centrándose en el corto plazo en lugar de mirar con perspectiva las consecuencias que un cierto tipo de solución podría haber tenido en el futuro un poco más lejos. En particular, el aspecto climático de las ciudades, más concretamente las condiciones de bienestar termo-ambiental del espacio urbanizado, ha sido el que ha provocado las consecuencias de la sobreurbanización. Esta situación se debe a la falta de organización y a la falta de interacción entre los distintos centros de toma de decisiones de los ciudadanos, como Milán y Nápoles, que son dos ciudades con una elevada densidad de población, pero que no tienen una amplitud proporcional a la población que las habita.

Después de la densidad de construcción, un segundo factor que afecta al calor urbano es el sellado de las superficies y por lo tanto la disminución de la vegetación en las zonas urbanas. Las zonas verdes son útiles ya que, gracias a los fenómenos de evaporación y evapotranspiración garantizada por plantas y prados, permiten disminuir la proporción de calor sensible, responsable del aumento de temperatura; la evapotranspiración es un proceso que implica la evaporación del agua subterránea a temperatura constante, gracias al cual aumenta la proporción de calor latente, a diferencia del calor sensible, y garantiza un menor aumento de la temperatura del aire. Incluso las copas de

los árboles, a través de su función de blindaje pueden atenuar el efecto de la radiación solar creando zonas de sombra.

Un factor muy importante a escala urbana es, sin duda, el requisito de absorción de la radiación solar de las carreteras asfaltadas o de las placas solares. En efecto, a menudo están constituidos por materiales con un alto coeficiente de absorción que permite alcanzar temperaturas muy elevadas en verano. Los tejados de los edificios representan aproximadamente el 20/25% de la superficie urbana. Algunos estudios han demostrado que la radiación solar incidente en los techos puede aumentar fácilmente su temperatura hasta 50-60 °C (Junjing Yang, 2018). El albedo de una superficie es la fracción de luz, o más en general, de radiación incidente que se refleja detrás en todas las direcciones. Cuanto mayor es el albedo (el valor máximo es 1) y mayor es la cantidad de radiación que las superficies urbanas reflejan en el espacio, impidiendo el almacenamiento de energía que se liberaría, aumentando la temperatura urbana. Un alto valor de albedo en las zonas urbanas sería un factor de reducción del calor, con efectos positivos a escala urbana, pero también a nivel de los edificios individuales. En efecto, al reducir el calor absorbido por los tejados, los edificios reducirían el uso de energía por enfriamiento, disminuyendo la carga térmica antropogénica.

El proceso de urbanización y el consiguiente crecimiento de las ciudades ha dado lugar a un elevado aumento de la densidad del tejido urbano y a una disminución relativa de la vegetación. La interacción entre la geometría urbana y la radiación solar incidente promueve y favorece el aumento de la intensidad de la UHI. El aumento de carreteras estrechas y superficies verticales tiende a configurar verdaderos cañones urbanos dentro de los cuales se modifica también la circulación del viento. Para definir un cañón urbano podemos utilizar la relación que relaciona la altura de los edificios (H) y la anchura de la carretera (W); cuanto mayor sea la relación (H/W) más profunda será el cañón urbano descrito y por lo tanto menor será la parte del cielo visible (Fig.4).

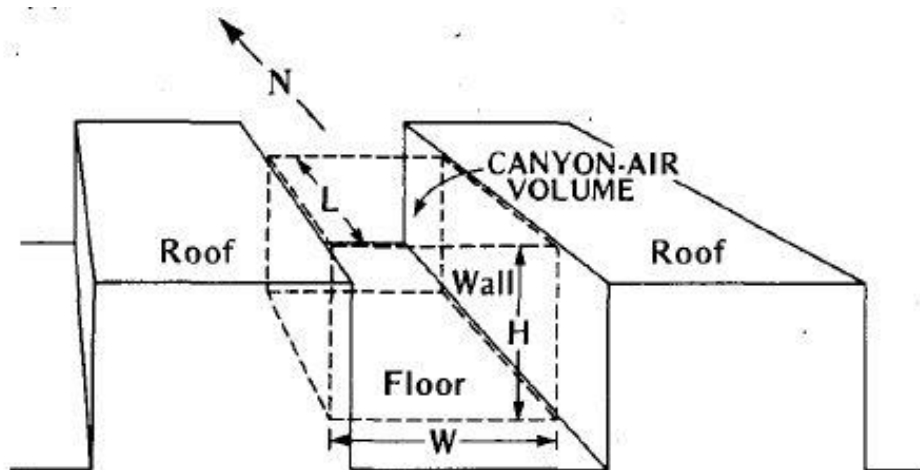


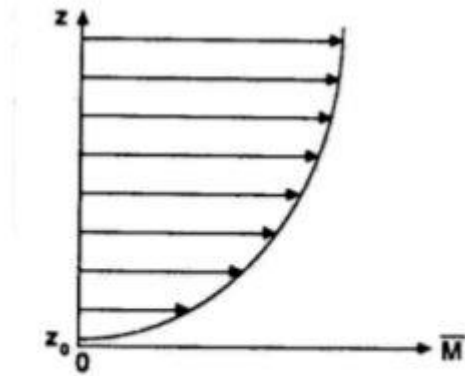
Figura 4 Geometría del cañón urbano (Nunez M. e Oke T. R. 1977)

La geometría de los cañones urbanos influye en el balance energético de los edificios, ya que la radiación solar nunca incide perpendicularmente, excepto en las horas centrales del día, por lo que se refleja varias veces en la superficie de la calzada y en las paredes de los edificios. La captación de la radiación solar e infrarroja es tanto mayor cuanto más altos son los edificios en comparación con la anchura de la calle. El aumento de las reflexiones implica la absorción de una mayor cantidad de calor, que luego será cedido a la atmósfera. Aquí es donde se desarrolla el llamado "efecto cañón", es decir, la energía irradiada por las radiaciones solares múltiples es atrapada en el corredor de la carretera, a diferencia de lo que ocurre en las zonas rurales donde la reflexión es mucho menor, si no hay nada, y ralentizan el enfriamiento del aire. Es evidente que la forma urbana condiciona tanto la entrada de la radiación solar como la presencia de vientos. Cuanto más rugosa es la ciudad, menor es la cantidad de viento que penetra la capa de dosel urban. La rugosidad se define por los elementos que componen la ciudad, los edificios. Cuanto mayor es la densidad de la ciudad, mayor es el valor de la rugosidad. El efecto afecta a los flujos de aire y, por tanto, a la penetración de la ventilación en el entorno urbano (cf. Oke, 1987). Para describir mejor las condiciones térmicas en los cañones podemos utilizar el sky view factor (SVF). Esta fracción visible del cielo se define como la relación, entre 0 y 1,

entre la radiación recibida (o emitida) por una superficie plana y la emitida (o recibida) por todo el entorno atmosférico. Cuanto más pequeña sea la proporción de SVF, más alta será la cantidad de energía que quedará atrapada y será cedida en forma de calor durante la noche.

2.3.2 Edificios

Otros factores que afectan al desarrollo de la UHI son los edificios y sus componentes. Como ya se ha explicado anteriormente, estos tienen un papel fundamental en la reflexión de la radiación solar y en particular en su absorción. Durante un típico día soleado, de hecho, la radiación solar incide primero en la superficie de la calle y en las placas solares y luego es absorbida y reflejada durante la noche por las mismas hacia las paredes de los edificios circundantes. Muy a menudo, en las zonas urbanizadas, sucede que los edificios están muy próximos, aumentando la densidad urbana, y sobre todo muy altos, provocando diversas reflexiones superficiales. Las múltiples reflexiones sobre edificios altos y muy cercanos tienen un doble efecto: aumentar la cantidad de calor liberado durante la noche y obstaculizar la entrada del viento en los cañones. De hecho, una geometría urbana densa reduce la velocidad del viento ya que las construcciones muy altas y cercanas resultan ser obstáculos aerodinámicos al viento, yendo a limitar los flujos de aire dentro de la Urban Canopy Layer, impidiendo la atenuación del calor por el viento; en caso contrario, es decir, si no hubiera obstáculos, representados por ejemplo por edificios, como sucede en las zonas rurales, se nota que la velocidad del viento crece aproximadamente siguiendo la curva logarítmica de la cuota (Fig.5).



M = intensidad del viento

Z = quota

Figura 5 Perfil logarítmico del viento (Stull 1988)

Los elementos de un edificio que influyen en la reflexión y la emisividad son sus revestimientos, tanto verticales como horizontales, por lo tanto, paredes y coberturas. En un marco más general, también son importantes las características térmicas de los cierres opacos y transparentes, con estas últimas principales causas del discomfort en los edificios.

En las construcciones desarrolladas en los decenios pasados no se daba importancia a los valores térmicos característicos de la envoltura de un edificio y mucho menos a las propiedades del asfalto, al menos no desde el punto de vista del medio ambiente o de la protección del clima urbano. De este modo se constituyó un patrimonio inmobiliario indiferente a las problemáticas ambientales puesto que cada necesidad del arrendatario se satisfacía mediante el uso de máquinas, como los acondicionadores y radiadores de rendimiento creciente para respetar las tarifas de confort de cada uno.

2.3.3 Componente humano

El componente de calor humano que tiene un papel relevante en la formación de la UHI se llama "calor antropogénico" ya que deriva de las acciones humanas dentro del contexto ciudadano. Desde el período de la industrialización, se ha producido un crecimiento creciente en el número de industrias presentes en el territorio y, por consiguiente, en las actividades llevadas a cabo por el hombre. Como consecuencia de este período ha habido una profunda urbanización debida a las necesidades del hombre de encontrarse en un lugar habitable y lo más cerca posible del lugar de trabajo. Además, con el nacimiento de los primeros coches se ha producido un profundo cambio debido a la capacidad de la población para moverse más fácilmente, lo que ha llevado a un aumento sustancial del tráfico urbano, con relativo aumento considerable de las entradas de gases contaminantes en la atmósfera, creando daños considerables tanto desde el punto de vista global como urbano, sin olvidar los daños causados a la salud humana. Las emisiones procedentes de la industria, los automóviles y los acondicionadores de aire tienen consecuencias muy graves para la salud humana.

2.3.4 Contexto ambiental

Los factores mencionados anteriormente, como la geometría y densidad de la ciudad, las características del tejido urbano y del revestimiento exterior de los edificios, las propiedades de los materiales de construcción, la presencia de vegetación, tipo de cierre vertical y la cantidad de emisiones de las industrias son muy influyentes en la intensidad de la UHI en las diferentes ciudades, pero sobre todo son controlables por el hombre. Entre los aspectos incontrolables sin duda tenemos las características de la ventosidad y la nubosidad, que junto con la radiación solar son los principales factores meteorológicos que influyen en el desarrollo de la UHI, generalmente con mayor intensidad en condiciones de cielo despejado y viento en calma. Por lo tanto, los factores ambientales que intervienen en el aumento de la UHI son

la ubicación geográfica y la topografía. Como se ha dicho, para el primero la discriminación son la nubosidad y la ventilación; en días con cielo claro y viento cálido, la intensidad de la isla de calor es máxima, ya que la cantidad de radiación solar que llega a las superficies es casi máxima y la acción mitigadora del viento es anulada por la falta de flujos de aire. Las ciudades costeras, o que albergan un cuerpo de agua, podrían beneficiarse de la reducción de la temperatura gracias a la generación de vientos que ayuden a disipar el calor acumulado de las superficies de edificios y espacios abiertos (EPA, 2009)

2.4 Las consecuencias de la isla de calor urbano

Otra consecuencia muy importante del fenómeno de la UHI es la salud de la población. Como es de suponer, el aumento de las temperaturas durante la temporada de invierno también podría evaluarse de forma positiva, ya que implica una menor exposición a temperaturas rígidas que podrían afectar al bienestar de los ciudadanos más débiles. Lo contrario ocurre con la temporada de verano. Precisamente el aumento de las temperaturas, ya elevadas, y el aumento de los fenómenos extremos, como las olas de calor, hacen que la temperatura media diurna y nocturna siga aumentando. Esta situación provoca, en los sujetos más débiles, una fatiga del sistema de termorregulación corporal y de malestar fisiológico.

Las consecuencias indirectas para la salud humana de la UHI se refieren a la contaminación ambiental. Como se ha mencionado anteriormente, el aumento de la temperatura exterior implica el uso espasmódico y casi automático de máquinas y acondicionadores de aire que mejoran el confort interior tanto en los edificios como en los medios de transporte, pero que producen calor, obviamente, introducido en el ambiente, por tanto, calentado aún más; por otra parte, al detenernos únicamente en la utilización del sistema de aire acondicionado en los medios de transporte, hay que poner de manifiesto que dicho sistema necesita una contribución suplementaria del motor y, por tanto,

un mayor consumo de carburante, es decir, una vez más las emisiones superan la media.

Haciendo así un balance de los efectos negativos (estación caliente) y positivos (estación invernal) los primeros son mucho más evidentes y sobre todo perjudiciales que los beneficios obtenidos en invierno. Estas conclusiones se basan en la consideración de que la mayoría de las metrópolis se encuentran en zonas de clima templado o tropical. Además, hay que señalar que el 10 % del consumo mundial de electricidad se debe a la utilización de los acondicionadores de aire (alrededor de 1600 millones) y que, según algunas estimaciones, estas instalaciones alcanzarán cifras muy elevadas en 2050, en torno a los 5600 millones de dispositivos. Sobre la base de estas estimaciones, es evidente que es necesario recurrir a medidas estrictas para intentar disminuir la magnitud del fenómeno para no llegar a un punto de no retorno en el que cualquier medida adoptada resulta superflua y marginal.

2.5 Técnicas de mitigación

Para definir los métodos de mitigación de la UHI es necesario que la política establezca estrategias y una planificación adecuada, útil para hacer frente al problema.

Los principales factores mencionados anteriormente que favorecen a la UHI son la caracterización urbana y su interacción con las radiaciones solares accidentales, las propiedades de los materiales que componen el revestimiento de los edificios, la falta de zonas verdes en el entorno urbano y la cantidad de gases contaminantes liberados en el medio ambiente en relación con las actividades y las necesidades humanas.

Con el fin de reducir la UHI, los elementos en los que hay que actuar son los siguientes:

- El aumento de las zonas verdes, garantizando su continuidad en el ámbito ciudadano y favoreciendo las zonas de sombra plantando árboles

- El aumento de las superficies reflectantes, trabajando con el albedo
- Reducción de las cargas antropogénicas
- El uso de materiales de construcción adecuados para el propósito

2.5.1 Áreas verdes

Cuando se habla de planificación urbana, se hace referencia a una estrategia que prevé la introducción de superficies destinadas a árboles y vegetación. Esta metodología de mitigación se considera una de las mejores por varias razones: en primer lugar, es la más barata de las existentes en la actualidad; en segundo lugar, es fácil de implementar en cualquier contexto. La realización de arboledas en los recorridos urbanos va a crear zonas de sombra que reducen la cantidad de radiación solar irradiada directamente sobre los pavimentos viales presentes debajo de las copas, llegando, durante el período estival, a disminuciones que pueden superar el 70%; la parte restante es absorbida por las hojas y reflejada en la atmósfera. No hay que olvidar el importante proceso de evapotranspiración que permite bajar la temperatura del aire.

2.5.2 Albedo

El albedo de una superficie es el poder reflectante de la misma, es decir, la capacidad que el cuerpo tiene para volver a introducir la fracción de luz en todas las direcciones. El albedo de valor 1 expresa la mayor cantidad de radiación que puede ser reflejada, por el contrario, un elemento con valores bajos de albedo no favorece la reflexión, sino que más bien favorece la absorción de la radiación solar, contribuyendo al calentamiento urbano. En el contexto urbano, por tanto, es fundamental evitar situaciones de absorción

excesiva de radiación procedente del Sol por parte de los edificios. Es importante, sobre todo en los contextos en los que puede desarrollarse el llamado efecto "cañón", aumentar el uso de superficies de albedo más grandes, para reflejar la radiación y evitar que el calor estacione dentro de la capa de dosel urbano y que se hace difícil la expulsión del calor del cañón. La característica principal de estos materiales será la coloración clara, capaz de rechazar una elevada cantidad de radiación, a diferencia de los colores oscuros que absorben todo el espectro luminoso. Aplicando estos cambios a los edificios se obtendrán valores también desde el punto de vista del confort interno. En efecto, una menor capacidad de absorción está directamente relacionada con la cantidad de calor que entra en las viviendas, que influye en el comportamiento de los residentes, empujándolos hacia la utilización de los climatizadores o de aparatos mecánicos, que tienen efectos muy graves en la demanda máxima de energía, en el consumo de recursos no renovables y en la cantidad de emisiones de gases contaminantes.

2.5.3 Cargas antropogénicas

Por lo que se refiere a la estrategia de reducción de las cargas antropogénicas, es el camino más complicado por recorrer y, con toda probabilidad, también el que más efectos tendría desde el punto de vista medioambiental. A lo largo de los años ha ido aumentando el uso de componentes mecánicos, tanto en edificios de uso residencial como en oficinas e industrias. Resulta evidente que la necesidad de recurrir a los aparatos artificiales varía en función de la caracterización térmica de cada contexto, es decir, de la cantidad de carga térmica emitida por el tráfico y de las industrias y del calor dispersado por los edificios. La temporada en la que es elevada la formación de una cantidad significativamente alta de cargas térmicas es seguramente la invernal, cuando hay mayor necesidad de calefacción debido al descenso de la temperatura. Las cargas térmicas, y por lo tanto el consumo de electricidad en los edificios, resultan ser influenciados notablemente por la intensidad de la UHI.

Para realizar un trabajo completo y no desigual, es necesario que las innovaciones aportadas desde el punto de vista de las fuentes de energía se

integren de manera sinérgica en una renovación adecuada y coherente del aislamiento térmico de los edificios. En efecto, es necesario reducir las necesidades de calefacción invernal y de refrigeración estival, teniendo en cuenta aspectos como la orientación de los edificios, las aportaciones solares y aprovechando las características de diseño pasiva.

Desde el punto de vista urbano, por el contrario, es necesario introducir sistemas de ahorro de energía como, por ejemplo, la iluminación pública, sistemas eficientes de transporte urbano (autobuses, tranvías, ferrocarriles) bajo nivel de emisiones, favorecer el uso de medios personales sostenibles, como bicicletas o medios eléctricos.

2.5.4 Materiales de construcción

La isla de calor es un fenómeno que puede tener muchas causas subyacentes, por lo que es difícil identificar el principal factor desencadenante. Sin duda la elección de los materiales a utilizar en el contexto de la ciudad es un aspecto importante que puede caracterizar los resultados e influir en la intensidad de la UHI.

Uno de los parámetros clave a los que hay que prestar atención es la inercia térmica

La inercia térmica es la capacidad de un material para variar su temperatura más o menos lentamente en respuesta a las variaciones de temperatura exterior o interior. Junto con la reflectancia térmica, es muy importante para evaluar correctamente la eficiencia energética.

Las superficies de los contextos urbanos actuales tienen un alto valor de admisión térmica, es decir, almacenan mucho calor que luego, gracias a las características de inercia térmica, se libera en los períodos del día en que la temperatura es ya más baja, Por la tarde/tarde. Sin embargo, hay que tener en cuenta que los tejidos de la ciudad se caracterizan por SVF bajos y cañones urbanos que, debido a su conformación, retrasan el proceso de dispersión de calor en el medio ambiente. Los elementos sobre los que actuar a nivel urbano

son carreteras, tejados y paredes verticales, tanto en las partes opacas como en las transparentes.

En la superficie de la calzada es posible actuar utilizando componentes permeables y que permitan la infiltración de agua en el subsuelo, favoreciendo el proceso de evaporación y el constante intercambio térmico con el ambiente sobrenadante, a fin de estabilizar la temperatura.

En cuanto a los edificios, las estrategias de mitigación de la isla del calor urbano prevén el uso de elementos "fríos" tales como cool roofs; la envoltura puede también ser constituida por materiales fríos, Pero en los últimos años se está estudiando la utilización de una nueva tipología de materiales, llamados smart, de los que se hablará más adelante. La principal característica de los Cool Roofs es utilizar materiales que reflejan una mayor cantidad de radiación solar que los materiales comunes.

2.6 Materiales innovadores

Los materiales cool no son los únicos elementos que garantizan un mejor rendimiento que los materiales de construcción comunes. Otros materiales que se han introducido en los últimos años son los llamados materiales "inteligentes", capaces de adaptarse a las diversas temperaturas y situaciones meteorológicas que se iban produciendo en los centros urbanos. De este modo se evitaba la obsolescencia de los edificios proyectados en épocas anteriores o con técnicas de construcción que no se adaptan a los climas actuales. Como veremos en el próximo capítulo, son varias las tecnologías que han sido estudiadas, desarrolladas e implementadas con el fin de obtener resultados mejores que los que se obtienen con los materiales comunes o incluso con los más recientes cool materials. Estas tecnologías favorecen la regulación de algunas características del material, que pueden ser la capa exterior opaca o el vidrio del componente transparente. Según el tipo de variación, qué la causa y sus efectos, existen varias clasificaciones.

Se ha hecho necesario estudiar estos nuevos materiales, ya que se ha entendido que el uso de los materiales "cool" no sólo aporta ventajas, sobre todo en determinados climas, ya que se limitan a favorecer el comportamiento estival, Va a crear un gran desequilibrio en la temporada de invierno. Este desequilibrio no se equilibra con las ganancias de verano, retrasando el uso de materiales frescos. Es aquí donde se insertan los materiales inteligentes, una familia de materiales inteligentes, capaz, con su variación, de disminuir los desequilibrios entre las varias estaciones, y al mismo tiempo favorecer una disminución de la temperatura en verano, y aumento en invierno, con consiguiente disminución de la UHI, ya que durante todo el año los materiales funcionan de tal modo que favorezcan las ganancias térmicas en función de la necesidad. En el siguiente capítulo se explican los comportamientos de los materiales inteligentes más difundidos, deteniéndose en particular en los termocrómicos, que, gracias a su capacidad de reflejar una mayor cantidad de radiación solar, y por lo tanto absorber menos, garantiza ganancias desde el punto de vista de la temperatura del aire, que resulta más fresca en verano y caliente en invierno. Precisamente en este tipo de materiales y en este comportamiento se basa el presente trabajo, explicado en los capítulos siguientes.

3. Materiales inteligentes

3.1 Generalidades y clasificación

El edificio, con sus componentes, es uno de los principales responsables del calentamiento y por lo tanto de la UHI. Como ya se ha dicho, el sector de la construcción, a lo largo de todo su ciclo de vida, desde la extracción de materias primas hasta la eliminación de los residuos de construcción y demolición, es responsable de aproximadamente el 40 % del consumo mundial de energía. Las exigencias que implican un mayor consumo de energía en los edificios están relacionadas con las necesidades de refrigeración y calefacción que cada vivienda necesita para establecerse dentro de un rango de temperatura de confort. Una reducción significativa de la demanda de energía puede lograrse mediante la implementación de envases más eficientes que los que se utilizan actualmente. En la actualidad, los edificios absorben una cantidad muy alta de radiación solar, lo que requiere aparatos mecánicos para enfriar los ambientes y alcanzar las temperaturas deseadas por los residentes. Con el uso de materiales más adecuados se conseguiría una clara mejora de las condiciones internas debido a una menor absorción de calor por parte de los revestimientos (dotados, por lo tanto, de mayor reflectancia y emisividad). Estos materiales son los llamados cool material, mencionados e ilustrados en el capítulo anterior. Yendo a afrontar una situación más general, no centrándose sólo en la mejora de la UHI y en el calentamiento global, sino también en el consumo de energía, los contaminantes presentes en el ambiente y la salud humana, se puede decir que los materiales frescos se limitan en cierto modo a la corrección de las necesidades de refrigeración durante el verano. En efecto, con su capacidad de absorber menos calor, permiten un menor calentamiento interno en verano, así como una menor reinyección de calor en el ambiente, disminuyendo tanto la demanda de energía para refrigeración como la contribución al calentamiento de la temperatura exterior. En cuanto a su comportamiento en las estaciones más frías, se ha estudiado que estas tecnologías tienen

desventajas importantes cuando se evalúa su contribución en las estaciones de invierno. Por lo tanto, se ha desarrollado la necesidad de utilizar materiales que sepan adaptarse a las diversas situaciones que se presentan en las ciudades, como por ejemplo veranos calurosos e inviernos fríos. Se han introducido los llamados materiales "smart", que se definen como capaces de modificar sus propiedades en función de las situaciones ambientales en las que se encuentren. El método principal para evaluar el rendimiento de los materiales de transformación dinámica está relacionado con su potencial para aumentar/disminuir el flujo de calor sensible hacia el interior del edificio durante el invierno y el verano en consecuencia. Una segunda forma se relaciona con su capacidad para aumentar / disminuir incluso la liberación de calor sensible a la atmósfera durante el período de calefacción/refrigeración y por lo tanto para ayudar a aumentar o disminuir la temperatura ambiente en función de las necesidades (Garshasbi, Santamouris, 2019). Gracias a la utilización de estos materiales se obtendrán, pues, envoltorios de tipo adaptativo. En el siguiente cuadro (Tabla 1) se desarrolla una distinción muy importante, tanto entre los materiales tradicionales, de alto rendimiento y los más recientes "smart"; además, se destaca la diferenciación entre "smart Tipo 1" e "smart Tipo 2".

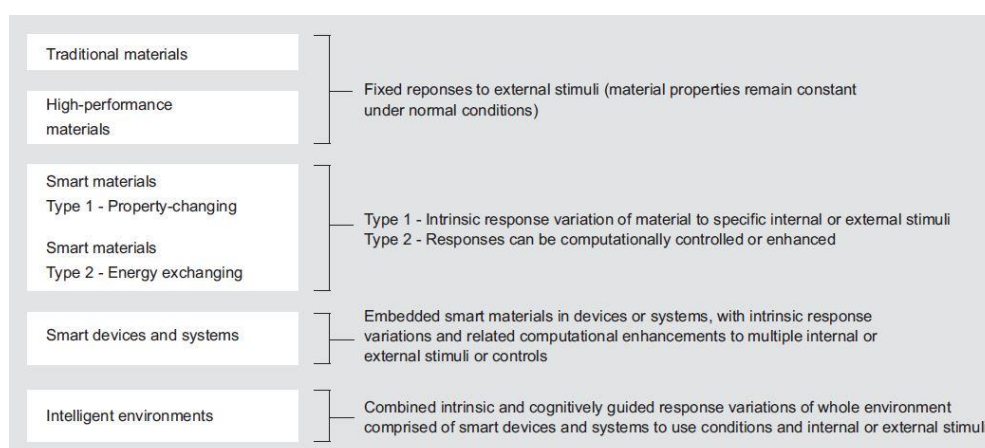


Tabla 1 Diferenciación entre materiales tradicionales e inteligentes (Smart materials, new technologies for the architecture design profession; M. Addington; 2015)

Observando la tabla tenemos:

- **Materiales tradicionales:** los utilizados en las construcciones tradicionales para realizar elementos de envoltura, pero también estructurales.
- **Materiales de alto rendimiento:** son los materiales innovadores, incluyendo los materiales cool, que, como se ha explicado, no varían en sus características a medida que varían las condiciones, lo que sólo mejora parcialmente los problemas existentes.
- **Materiales inteligentes o inteligentes:** estos materiales tienen la capacidad de variar al menos una propiedad a la variación de las condiciones ambientales externas. Observamos que la tabla distingue dos tipos de materiales inteligentes: la tipología 1, también llamada smart property changing, modifica sus propiedades (de ahí el nombre property changing) en función de una variable externa, por ejemplo, la temperatura del aire, de la superficie, la radiación solar, etc. En la mayoría de los casos, la propiedad que se modifica es la coloración, en función de las variables externas. La tipología 2 define los materiales de intercambio de energía, que permiten variar el tipo de energía a la que el material está sujeto. Un ejemplo clásico de intercambio de energía es la energía fotovoltaica, que, sujeta a la energía solar de la radiación ultravioleta, transforma estas últimas en energía eléctrica utilizable por los propietarios. También existen los materiales de intercambio de energía de tipo bidireccional, que, cuando están sujetos a variaciones de campo eléctrico, producen variaciones de tipo térmico y viceversa.

Existen cinco propiedades fundamentales de los materiales inteligentes que pueden ayudar a distinguir entre estos últimos y los materiales de alto rendimiento. Estas propiedades son las siguientes:

- **Inmediatez:** el material debe responder a la variación ambiental de forma instantánea.

- Transitoriedad: responden a las diferentes condiciones ambientales con configuraciones estables.
- Auto activación: los materiales inteligentes se definen de esta manera ya que no necesitan ser activados por un sensor o un ordenador, sino que es el propio material que está dotado de una inteligencia intrínseca que le permite adaptarse a sus características.
- Selectividad: la respuesta del material a las condiciones ambientales debe ser previsible, es decir, debe ser posible conocer su comportamiento en las múltiples condiciones ambientales en las que puede variar.
- Direccionalidad: es decir, la respuesta debe ser local al evento activador. Esto significa que el material cambia su característica sólo en función de la variación del campo ambiental para el que fue diseñado.

Los materiales enumerados a continuación poseen todas estas propiedades, por lo que pueden clasificarse como inteligentes.

Los materiales del tipo 1 suelen variar en cuanto al color, la viscosidad o la rigidez; la diferencia se define por la entrada que puede ser de distinta naturaleza, es decir, la temperatura, la radiación solar o el campo eléctrico.

Los materiales de tipo 2 modifican la cantidad de energía o el tipo de energía a la que está sujeto el material como entrada y salida. Por ejemplo, como resultado de la variación de la energía eléctrica, térmica, o magnética, se puede obtener variación luminosa.

Los materiales cromogénicos (de cromo, color) basan su funcionamiento en las particulares propiedades fisicoquímicas que permiten un cambio reversible de las propiedades ópticas, en función de las condiciones climáticas exteriores y de las exigencias de gestión y funcionales internas. En este tipo de vidrios se produce un cambio de estado de un elemento transparente, a través del cual la radiación solar pasa fácilmente, a un elemento translúcido o semiopaco, que no favorece la transmisión y que refleja parcialmente la radiación solar. La interacción con el entorno exterior, por lo tanto, permite al vidrio realizar funciones que van más allá del tradicional punto de paso por

la luz solar. Los materiales "inteligentes" logran modificar las propiedades ópticas, como por ejemplo la reflectancia, la transmitancia y la emitancia, en respuesta a variaciones o estimulaciones externas (temperatura, intensidad de la radiación sola, paso de corriente en el material).

La clasificación de los materiales inteligentes de tipo 1 se efectúa según la naturaleza de la entrada que provoca el cambio, articulando como sigue:

- Foto-crómicos
- Electrocrómicos
- LCD
- Gas-crómicos
- Mecanocrómicos
- Termo crómicos
- PCM (no cromogénico)

3.1.1 Materiales fotocromáticos

Los cristales foto crómicos se caracterizan por su capacidad de modificar su característica de transparencia en función de la radiación ultravioleta que les afecta. En el momento en que la irradiación termine o reduzca su potencia radiactiva, también el vidrio tendrá un comportamiento reversible, aclarándose al disminuir la intensidad de la radiación. En el momento en que se activa el mecanismo foto crómico, la transmisión luminosa se modifica en función de la cantidad de luz incidente, ya que las superficies acristaladas asumen una coloración cada vez más gris. Esta tecnología es muy funcional en verano, cuando la intensidad de la radiación es elevada y por lo tanto se prefiere evitar el sobrecalentamiento interno y el consiguiente uso de climatizadores. Durante las estaciones invernales, en cambio, en las que el Sol incide de manera menos consistente sobre la superficie terrestre, a menudo se tiene la necesidad de favorecer lo más posible la entrada de la radiación solar con el fin de calentar los ambientes de manera natural, sin utilizar dispositivos mecánicos. Se convierte, por lo tanto, en un aspecto

potencialmente negativo ya que en invierno la tecnología no es óptima, ya que disminuye la posibilidad de penetración de la radiación luminosa y, por consiguiente, la ganancia solar y térmica en ambientes en los que, por el momento, se prefiere calentar de forma natural, no sombreando. Lo que sucede en un material foto-crómico en la superficie externa es el paso del color blanco a un color más oscuro, que normalmente es azul o rojo. En cambio, por lo que se refiere al mecanismo que permite esta mutación cromática, se trata de un proceso químico en el que un compuesto, debido a la exposición a una radiación electromagnética (como la UV), genera una transformación reversible entre dos configuraciones energéticas con diferentes espectros de absorción, que caracterizan el cambio cromático. Como se trata de un proceso reversible, basta con eliminar la fuente luminosa para restablecer las condiciones iniciales. Los principales campos de aplicación de los materiales foto-crómicos son las lentes de vista o de sol y las smart windows. Gracias a su capacidad de modificar la transparencia del vidrio en función del nivel de exposición a la radiación solar, y sobre todo a la característica de la inmediatez propia de los materiales inteligentes, Esta tecnología es muy útil para proteger el ojo humano de la radiación ultravioleta altamente peligrosa y potencialmente perjudicial. El efecto que se obtiene al aplicar el fotocromismo a las ventanas de los edificios es el de impedir fenómenos de deslumbramiento, mejorando el confort interno de las viviendas. El mecanismo de transición del color da un color claro y transparente a una más oscura viene determinado por la presencia en forma dispersa, dentro de la pasta del vidrio, de sustancias químicas (sales de plata, cloruro y bromuro) y compuestos orgánicos (cromeníes, fulgidos, azobencenos, aniales). A través de la descomposición reversible de los microcristales, la energía es absorbida por la radiación electromagnética mediante la modificación de las características ópticas.

3.1.2 Materiales electrocrómicos

Entre los materiales cromogénicos comerciales está presente también la familia de los electrocrómicos. La particularidad de esta categoría es que

permite una variación de la coloración en el momento en que el material está sujeto a una diferencia de potencial eléctrico. El fenómeno del electrocromismo es complejo y se produce en elementos que tienen un grosor total de unos pocos micrómetros.

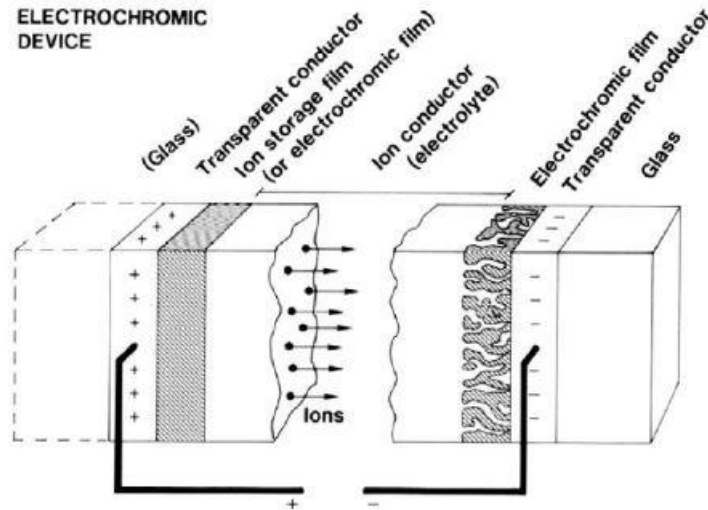


Figura 6 Representación de un dispositivo electrocrómico. (*Electrochromics for smart windows: Oxide-based thin films and devices*", Granqvist, 2014.

En la Fig. 6 se muestra un dispositivo electrocrómico de 5 capas. Las capas más externas permiten generar un campo eléctrico constante a lo largo de toda la superficie del material y se realizan depositando óxidos metálicos sobre el vidrio, haciéndolo conductor. Es importante, para obtener un resultado uniforme en términos cromáticos, que la deposición se realice de manera constante sobre toda la placa acristalada, de modo que se eviten zonas más coloreadas y, por tanto, más operativas que otras. Las dos capas más interiores son capas que tienen propiedades electrocrómicas, en particular la capa colocada en correspondencia con el ánodo del dispositivo es una capa que siendo realizada con un material semiconductor (p. ej., dióxido de titanio, o platino, o material que de todos modos tiene propiedades de semiconductor) es capaz de ceder iones positivos cuando está sujeto a carga eléctrica, también en este caso positivo. En algunos casos, esta capa puede tener características termo-cromáticas, por lo tanto, variar de coloración en el momento en que compra o cede electrones, pero generalmente se utilizan materiales con propiedades ópticas fijas, que no varían su transparencia en función de los

iones, sino que es intrínseca a las características del material. En el lado negativo del dispositivo, en el cátodo, hay una película electrocrómica, que, cuando está sujeto a la adquisición de iones positivos, sufre una variación de coloración. Entre las dos capas electrocrómicas hay una capa de electrolitos o material conductor que permite una migración constante de electrones o iones de una capa a otra. En las realizaciones pasadas, a menudo se utilizaba un electrolito líquido, que no garantizaba la misma funcionalidad y fiabilidad que los últimos electrolitos sólidos. (Granqvist et al,1998).

Entre los materiales que garantizan propiedades electrocrómicas están aquellos con coloración catódica. La característica de estos materiales es la de modificar la coloración como resultado de la recepción de iones positivos, o pérdida de electrones, como por ejemplo el óxido de tungsteno (WO_3) que se presenta transparente y después de la oxidación se vuelve azul oscuro. Los materiales de color anódico, en cambio, son cromo, hierro, cobalto, níquel, etc. Es posible integrar los dos tipos de coloración realizando un material con dos capas diferentes que apoyen estas tecnologías, de modo que, desde su integración, se obtenga un efecto total. En efecto, tal integración permitiría el paso del material de un color oscuro a uno claro cuando se torva en combinación anódica, mientras que permitiría un comienzo de una tonalidad clara en el momento en que se encuentra en combinación catódica

3.1.3 LCD

Otro dispositivo cromogénico es el sistema de cristal líquido. Se trata de un aparato constituido por un elemento líquido que incluye en su interior una serie de partículas de cristales, que tienden a direccionarse, por lo tanto, a insertarse de manera constante y regular, cuando los dos cristales (que, por supuesto, siempre deben ser tratados con revestimiento conductor) se someten a un campo eléctrico. En ausencia de este último, los cristales se distribuyen de manera irregular y aleatoria en el interior del líquido, dando lugar a una difusión de la radiación solar o de la radiación luminosa de entrada (Cardillo, Marinelli, 2008). El efecto es cambiar la relación entre la radiación especular, por lo tanto, la radiación directa que se transfiere dentro del entorno, y la

radiación difusa. En el caso de vidrio desactivado, toda la radiación transmitida es de tipo difuso, por lo que no se puede ver lo que hay detrás, pero por ejemplo el vidrio puede ser de vidrio de rosca, por lo que es posible proyectar algo sobre él, que sigue siendo transparente, pero no permite la visión. Cuando se activa el dispositivo, toda la radiación es de tipo especular, por lo que es la radiación directa que se transmite dentro del ambiente.

3.1.4 Materiales cromáticos de gas

Un material cromogénico muy poco utilizado es el gas crómico. Esta tecnología aprovecha la propiedad del óxido de tungsteno para cambiar de color cuando está en contacto con una cantidad de hidrógeno, suponiendo en porcentajes bajos. Combinando el óxido de tungsteno con una fina capa de platino obtendremos una reacción de óxido-reducción; variación que permite el cambio cromático del óxido. Los sistemas gases crómicos necesitan ser insertados dentro de un vidrio triple en el cual la primera capa interna está compuesta por una capa de aire normal, mientras que en el orientado hacia el exterior se inserta un distanciador particular con una tubería que permite inyectar pequeñas cantidades de hidrógeno o de oxígeno puro. La entrada se realiza según el comando del usuario que, según su elección, inicia el proceso gas crómico, si introduce hidrógeno, determinando la coloración azul de toda la ventana (Blanco, 2014). Una ventaja sobre el material electrocrómico es que el cambio cromático será sin duda uniforme en toda la superficie de cristal, mientras que en los electrocrómicos puede darse una situación de divergencia en caso de que el depósito de óxidos en la superficie sea incorrecto. Sin embargo, la necesidad de integrar el sistema de gas en un vidrio triple se convierte en un elemento disuasorio para la difusión de la tecnología en el mercado de la construcción.

3.1.5 Materiales mecano crómicos

Otra tipología de materiales cromogénicos es la de los mecanismos cromómicos. Estos materiales se encuentran entre los más recientes, los primeros estudios se remontan a hace cinco años, de paternidad de un grupo de investigación chino, que ha patentado un sistema que cambia a nivel cromático en función de la tensión del material. En particular, cuando la tensión es nula, el color de material es verde, por el contrario, bajo una carga de compresión o flexión, el material empieza a asumir tonalidades que tienden al rojo. El sistema mecano crómico permite deducir, de un material en flexión, las áreas que tienen una tensión de compresión o tracción mayor y las áreas de tensión menor (sujetas, quizás, a momento de flexión nulo), a través de un análisis cromático. El potencial de los materiales mecanográficos puede tener un gran desarrollo en el ámbito de la construcción, especialmente en su aplicación estructural y arquitectónica. En el primer caso sería útil para identificar deformaciones de elementos estructurales que a simple vista no serían detectables; mientras que, desde el punto de vista arquitectónico, podrían integrarse en la fachada explotando el cambio de color en el momento en que se someten a la presión del viento o en función de la carga o deformación de las envolturas. Como se mencionó en un principio, son una tipología de materiales muy innovadora, por lo que todavía no se ha implementado y se ha extendido en el mercado. Sin embargo, debido a su eficacia y validez, en los próximos años podrían utilizarse en la práctica de la construcción.

3.1.6 Materiales termocrómicos

Una tipología de material cromogénico que se ha profundizado mucho es la de los termo crómicos, objeto de estudio del presente trabajo de tesis. El termocromismo es la capacidad de un material para cambiar de color cuando se supera una temperatura umbral determinada (llamada temperatura de transición), permitiendo también el mecanismo inverso. El comportamiento

termo-crómico es opuesto al foto-crómico ya que este último, en su configuración natural, por lo tanto, en ausencia de irradiación solar, se presenta de color claro que va oscureciéndose poco a poco en relación con la intensidad de la radiación incidente. Por el contrario, el material termo-crómico tiene un color natural más oscuro que el que se genera con el aumento de la temperatura exterior. Precisamente por esta razón, una de las principales aplicaciones de los materiales termocrómicos es la de la mitigación de las UHI. El comportamiento termo-crómico es muy importante a nivel urbano y permite obtener ventajas mucho mayores respecto a los materiales tradicionales o incluso a los materiales innovadores, previamente estudiados e identificados como cool materials. En efecto, estos últimos sólo responden de manera adecuada a las tensiones estivales en la medida en que, al ser de color claro, tienden a no absorber la radiación solar con el fin de no sobrecargar las viviendas con cargas térmicas excesivas respecto a las requeridas. Sin embargo, este comportamiento resulta ser una desventaja si tenemos en cuenta el período invernal, durante el cual la ganancia térmica es necesaria para garantizar el confort térmico requerido en un contexto de viviendas u oficinas, evitando de alguna manera el uso de la calefacción por medios mecánicos que contribuyen a la UHI. La mejora aportada por el estudio del mecanismo termo-crómico va precisamente en esta dirección, es decir, parte de la capacidad de adaptación del material a las diferentes estimulaciones climáticas exteriores, en cuanto éste, cambiando su coloración, varía también el espectro de absorción, con la consecuencia de que el material termo-crómico adquiere la capacidad de favorecer tanto el enfriamiento, como también lo hacen los materiales cool, como el calentamiento, gracias a la capacidad de variar el aspecto cromático y luego absorber la radiación solar útil para el calentamiento.

El mecanismo subyacente del funcionamiento termo crómico está garantizado por la estructura molecular de los pigmentos que produce un cambio en el espectro del color visible. De hecho, los termocrómicos están compuestos por una mezcla de colorantes orgánicos "leucoides".

Estos colorantes se componen de:

- Ácido débil aceptador de electrones, que permite la realización y sobre todo la reversibilidad del color en los materiales termocrómicos;
- Éster cíclico que dona electrones y es responsable de las características cromáticas del producto final que ha sufrido variación termo-crómica;
- Disolvente, que desempeña el papel de regulador de la fase de transición a través de su punto de fusión, momento en el que se produce el cambio cromático.

Es importante que estos elementos se encierren en microcápsulas, no mayores de 15 nanómetros, que sirven para proteger los componentes termocrómicos de las acciones externas y de los componentes químicos que lo rodean (ej. pinturas).

3.1.7 PCM

Los PCM (Phase Change Material, materiales de cambio de fase) son una tipología de materiales distintos de los cromogénicos, pero que se clasifican como "Tipo 1" de los materiales inteligentes. Los PCM son change property, es decir, experimentan un cambio de propiedad al variar una condición externa. En este caso, la propiedad que cambia es el estado físico del material a una temperatura dada, pasando de sólido a líquido, de sólido a gaseoso y viceversa. Nacidos inicialmente como materiales útiles para la NASA para trajes e instrumentos que deben adaptarse a las grandes variaciones que sufren en este campo, la investigación se ha dirigido a la bio-construcción y a la arquitectura sostenible, con el fin de aprovechar las capacidades de los PCM. Las soluciones más utilizadas son las que prevén un cambio sólido-líquido, ya que es más eficiente desde el punto de vista del volumen de material requerido que las transformaciones sólido-gas y líquido-gas. El mecanismo subyacente de la tecnología PCM es precisamente el cambio en el estado físico del material del que se compone el revestimiento. Durante la fase de

transición, en efecto, el material adquiere energía en forma de calor latente, necesario para que se produzca el cambio de fase; luego debido al calor sensible, tendremos de nuevo un aumento de la temperatura. En el momento del paso de fase se observará también un cambio en la relación entre la radiación directa y la radiación difusa, como se puede observar también con el agua que, en estado líquido es transparente, mientras que cuando alcanza la temperatura de solidificación y se transforma en hielo, notaremos que pierde la característica de transparencia total, convirtiéndose en opalescente. Los PCM son materiales orgánicos e inorgánicos. Entre los materiales más populares para la implementación de esta tecnología está la parafina, una mezcla de hidrocarburos sólidos, que tiene la propiedad de cambiar de fase, de sólido a líquido, a una temperatura que puede variar entre 18 °C y 45 °C. Una vez determinada la temperatura de solidificación o licuefacción, en función de la temperatura de uso del elemento al que se va a insertar, el material es capaz de absorber calor en el momento en que cambia la fase de sólido a líquido (calor latente) y luego sigue aumentando su temperatura debido al calor sensible. En cambio, cuando la temperatura desciende por debajo de la temperatura de fusión, antes de solidificar, libera calor en forma de calor latente dentro del ambiente, que por lo tanto se ve favorecido por este comportamiento. De ello se desprende que los PCM logran garantizar la misma masa térmica, o capacidad térmica, que los materiales tradicionales (los PCM transfieren calor latente, mientras que los tradicionales intercambian calor sensible), con marcada disminución de los grosores necesarios, obteniendo los mismos resultados. Se ha comprobado que, con 1,5 cm de material de cambio de fase, integrado en una placa de yeso, se obtiene una acumulación térmica equivalente a un espesor de aproximadamente 6-9 veces el hormigón o 10 veces si se compara con el ladrillo lleno, ofreciendo una ventaja considerable en cuanto a la inercia térmica.

Los problemas que deben tenerse en cuenta en el momento del diseño son diferentes, como por ejemplo la necesidad de equipar los PCM de contenedores con características tales que deben soportar variaciones de

volumen (15/20%) que el material sufre en el momento de la transición de fase (Triggiano, 2020). Un aspecto crítico de los materiales de cambio de fase es la estabilidad de las propiedades térmicas y mecánicas a lo largo del tiempo. La durabilidad depende del material utilizado, del tipo de solución utilizada (en solución, en tortas, dentro de bolsas) y de las temperaturas de transición. No hay que subestimar la problemática de la separación de fases o segregación. Consiste en la sedimentación en el fondo de la fase con mayor densidad a diferencia de la fase menos densa que compondrá la capa superficial. Esto ocurre en el caso de las mezclas, ya que las sustancias puras suelen permanecer homogéneas incluso después del paso de fase. Para resolver este problema, la solución más común es aumentar la viscosidad del PCM mediante la adición de materiales que, entre otras cosas, se caracterizan por una alta conductividad para mejorar el intercambio térmico. El mayor problema que sufren los PCM es el subenfriamiento, es decir, el fenómeno por el cual el material no solidifica inmediatamente, tendiendo a cristalizarse a temperaturas más bajas que la temperatura de fusión establecida, retrasando la liberación de calor latente. La solución que se ha adoptado es la adición de aditivos que ayudan al desarrollo de la fase sólida.

Los PCM se utilizan para el rendimiento de los edificios y, de acuerdo con el rango de temperatura, desempeñan mejor determinadas funciones que otros; en particular, fueron definidos (Cabeza et al, 2011) intervalos de temperatura ideales:

- hasta 21 °C para aplicaciones de refrigeración
- 22°-28°C para garantizar la comodidad
- 29°-60°C para aplicaciones relacionadas con el agua caliente sanitaria

En general, el uso de PCM en el interior de los edificios es muy amplio; en relación con el objetivo definido, las aplicaciones se refieren a envolturas, suelos y techos, superficies de ventanilla, materiales estructurales o unidades de almacenamiento térmico. Según las necesidades, existen PCM activos, que explotan bombas y ventiladores para el transporte de calor, y PCM pasivos

(los más interesantes desde el punto de vista de la construcción), que almacenan energía liberándola en forma de calor cuando es necesario.

4. Objetivos

Lo que se pretende hacer con este Trabajo Fin de Máster es evaluar el impacto en la reducción del efecto de la UHI por la aplicación de materiales termocrómicos a edificios de viviendas. En particular, se quiere comprender si hay la posibilidad de obtener beneficios micro climáticos en la zona estudiada mediante la evaluación de los parámetros climáticos (velocidad del aire, temperatura urbana, temperatura superficial, radiación emitida y absorbida).

Este objetivo general se desarrolla en los siguientes objetivos específicos:

1. Estudio de la isla de calor urbano

La UHI es un problema que afecta todas las ciudades del mundo y tiene reflejos en varios aspectos: la salud de la gente, el nivel de contaminación del aire y las temperaturas urbanas. Ha sido fundamental comprender los factores que intervienen y definen la UHI con atención particular a la morfología y medio ambiente alrededor de la zona considerada para poder actuar directamente y enfocándose sobre los parámetros más importantes. Gracias a estos estudios ha sido posible entender, también, de qué manera actúan los materiales aplicados sobre las fachadas, el rol que tienen para el entorno y también a nivel de habitación.

2. El funcionamiento de los materiales termocrómicos

Este trabajo se pone como objetivo general evaluar una posible solución para la disminución de las temperaturas que se registran durante el verano y el aumento de las mínimas en invierno. Para cumplir con este propósito, se ha intentado seguir con los estudios previos sobre la aplicación de los materiales cromogénicos a los edificios, eligiendo, entre este vasto grupo, la tecnología que mejor se adapta al objetivo del trabajo, es decir, los termocrómicos. Entonces, ha sido necesario entender la naturaleza de esta tecnología, cómo se configura su funcionamiento y en particular ha sido importante elegir las

características de aquellos que mejor se incorporan con el ambiente y el entorno.

3. Evaluación de las consecuencias de la utilización de los materiales termocrómicos

Después del estudio de las características de la UHI y de los materiales cromogénicos, se procedió con la evaluación cuantitativa de cómo el material innovador elegido, es decir el termocrómico, pueda contribuir con un mejor confort térmico al interior de las viviendas sino también en el contexto urbano. Por esto es fundamental estudiar como varía la temperatura superficial y exterior al momento en el que se ponen materiales termocrómicos en fachada. En particular, ha sido necesario comprender si el empleo de los termocrómicos en la ciudad puede permitir una mejora del estilo de vida gracias a temperaturas que son más bajas en verano y altas en invierno. Para alcanzar este objetivo, se ha estudiado la influencia que tienen algunos parámetros que se ha estimado fundamentales para la mitigación de la UHI, como por ejemplo la velocidad del aire, la radiación absorbida y emitida por los edificios, la temperatura urbana, la temperatura superficial.

5. Metodología

Para alcanzar el objetivo principal y los específicos, ha sido necesario hacer varias operaciones, necesarias para poder aprender, comprender y aplicar los conceptos descriptos en la literatura y herramientas utilizadas.

La tesis se ha desarrollado segundo algunas pautas que han dividido el trabajo en fases (Fig.7) para ordenarlo y garantizar un desarrollo homogéneo y fluido.

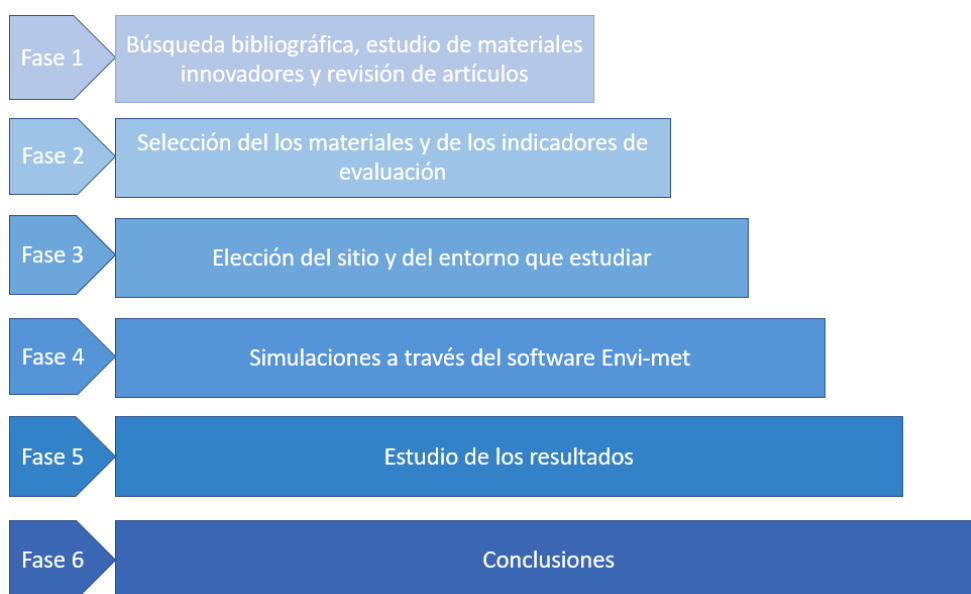


Figura 7 Fases de desarrollo del trabajo

En la **FASE 1 (Búsqueda bibliográfica, estudio de materiales innovadores y revisión de artículos)**, la fase inicial, ha sido necesario hacer una revisión de la literatura reciente respecto a los temas fundamentales de este trabajo. El enfoque ha sido sobre los temas mencionados anteriormente, o sea, la UHI y el tema de los materiales inteligentes con las motivaciones que inducen los cambios en estos materiales. La fase 1 es la que ha visto la comparación de las informaciones entre el número más grande de artículos científicos, en particular, entre los varios, estudios efectuados por Berardi, Fabiani, Karlessi, Santamouris, Jiangying, Synnefa.

Para poner en marcha este estudio, fue necesario, en primer lugar, obtener una visión global y completa de los estudios realizados hasta la fecha sobre la UHI, con sus causas y consecuencias, pero, sobre todo, estudiar qué técnicas se han considerado satisfactorias y adecuadas para mitigar este fenómeno. En

este sentido, se ha decidido elegir los materiales termocrómicos como objeto de estudio,

La FASE 2 (Selección de materiales y de los indicadores de evaluación).

Después del estudio teórico de la UHI y de los termocrómicos, se ha pasado a la aplicación de los conceptos principales en un caso real, actuando sobre los parámetros que afectan al comportamiento de estos materiales innovadores. Desde los artículos estudiados, estaba claro que los parámetros sobre los cuales actuar fueran la reflectancia, absorción, relacionados entre los dos, y emisividad. A través de "Development and testing of thermochromic coatings for buildings and urban structures" (Karlessi et al, 2009) se ha podido comprender cuáles son algunos posibles rangos de variación de las características de reflectancia y emisividad en los dos casos de los materiales termocrómicos (fase invernal, coloreada, y fase estival, no coloreada). A continuación, se seleccionó de dicho artículo uno de los materiales ensayados y los valores característicos correspondientes, con el fin de utilizar estos datos para la evaluación que debe realizarse en el caso del estudio examinado.

La selección se ha efectuado eligiendo el material que, según lo observado en las tablas suministradas, garantiza la variación de reflectancia más alta posible, con el fin de hacer más evidente la diferencia en el momento en que se produce el cambio cromático. Por el contrario, en el caso de partida, al no disponer de datos sobre las características de los materiales que componen actualmente las fachadas de la parte de la ciudad examinada, se ha optado por establecer una media entre los valores de reflectancia de la fase coloreada (el caso elegido tiene coloración invernal verde) y de la fase no coloreada (blanca) del material termocrómico elegido previamente.

La FASE 3 (Elección del sitio y del entorno que estudiar) ha sido importante, ya que supone el punto de partida del análisis llevado a cabo en este trabajo. Antes de todo se decidió la localización del entorno geográfico, teniendo en cuenta la necesidad de datos meteorológicos fiables para que los

resultados fueran atendibles. Por esta razón, el caso de estudio se desarrolla en correspondencia de la estación meteorológica de Bari.

La **FASE 4 (Simulaciones a través del software Envi-met)** se enfoca en la implementación del caso de estudio en el programa informático Envi-met 4.4.5, un software que simula la evolución temporal de diferentes parámetros termodinámicos en un rango de microescala, creando un modelo 3D no hidrostático de las interacciones entre edificio-atmósfera-vegetación. Las simulaciones han sido efectuadas considerando datos horarios del día más frío y del más caluroso del año 2017, según los datos recuperados desde el ARPA, siendo el día más frío el 19 de enero 01 y más caliente el 24 de julio. De dichos días, se han tenido en cuenta las 6.00 y 15.00 horas para realizar los estudios comparativos.

En la **FASE 5 (Estudio de los resultados)** se han estudiado los resultados obtenidos desde las simulaciones efectuadas, en particular antes de todo se ha desarrollado un estudio de como expande la UHI en el caso base, con materiales tradicionales. Durante las primas simulaciones, se han valuados los parámetros que influyen la UHI, cuales:

- Velocidad del viento
- Temperatura del aire
- Radiación reflejada

Después, se ha hecho una comparación entre el caso base y el de estudio, con los materiales termocrómicos. En particular, se contrastan las diferencias entre las simulaciones según los valores de un conjunto de parámetros. Esta comparación ha sido realizada para los siguientes parámetros:

- Temperatura del aire.
- Temperatura superficial de los edificios.
- Radiación absorbida por los edificios.

- Radiación emitida por los edificios

Se ha decidido no comparar la velocidad del viento porque, al hacer simulaciones en el mismo día, no variando la morfología urbana, es obvio que este parámetro no varía.

La **FASE 6** (Conclusiones) es la última, que se enfoca en el estudio de los resultados obtenidos en la fase anterior. En esta fase fue fundamental el dominio de los temas previamente estudiados, principalmente de la fase 1, los cuales fueron aplicados a los resultados obtenidos de las simulaciones. En consecuencia, se sacaron conclusiones y también se elaboró una visión crítica sobre lo que podría suponer el desarrollo futuro de los materiales termocrómicos aplicados a edificaciones para mitigar la UHI.

6. Estado de la cuestión

6.1 La isla de calor urbano

La UHI tiene fuertes impactos sobre la energía consumida por los edificios durante el período estival y aumenta notablemente el consumo de energía por refrigeración y el correspondiente pico de energía requerido. Esto se asocia con un aumento importante de la concentración de contaminantes urbanos (Santamouris, 2015).

El hombre tiene un rol fundamental dentro del aumento de las temperaturas, como ya hemos visto antes. De hecho, una mayor presencia de ciudadanos y, consecuentemente, de construcciones lleva al aumento de consumo energético. Las previsiones sobre el consumo futuro de energía en edificios residenciales y comerciales sugieren que, en 2050, podría aumentar hasta un 750 % y 275 %, respectivamente, debido al cambio climático global, el enorme aumento de la población y el esperado aumento de los sistemas de refrigeración en el mundo (Santamouris, 2017).

También se han hecho estudios sobre la interacción entre el calor desarrollado entre las ciudades y particulares condiciones climáticas, así que se vuelve fundamental el estudio de estos parámetros relacionados a la mejor disposición urbana que no favorezca la formación de este fenómeno.

En la ciudad costera de Chania (Grecia), la UHI alcanza su máxima intensidad durante el verano. Se ha demostrado una fuerte relación entre la UHI y las condiciones climáticas locales. En particular, la formación de UHI está muy influida por la velocidad y la dirección del viento. Otro estudio realizado en Barcelona (España) ha demostrado que, en verano, debido al efecto de la brisa marina, la intensidad de la UHI es más débil. Por consiguiente, la intensidad máxima de UHI se alcanza en diciembre (Floral, 2020).

6.2 Las consecuencias de la isla de calor urbano

La consecuencia directa de la UHI, detectable incluso sin instrumentos particulares o estudios pasados, es seguramente el aumento de las temperaturas, tanto en verano como en invierno. Es natural que los momentos en los que se notarán más estos efectos sean los días de verano caracterizados por oleadas de calor intenso, que de hecho se están haciendo más frecuentes a lo largo de los años, y, por consiguiente, se notará el aumento de las temperaturas máximas, con todas las molestias que este cambio implica.

Si las olas de calor representan la consecuencia principal de la UHI, es posible considerar como corolario el mayor uso de acondicionadores, ventilación mecánica y aire acondicionado que será necesario para garantizar el enfriamiento de los ambientes interiores, viviendas, pero sobre todo oficinas, de modo que garantice el confort térmico de las zonas vividas cotidianamente.

El uso masivo y a veces desmesurado de estas máquinas es también una consecuencia directa del elevado nivel de urbanización, como ya se ha descrito anteriormente, que, según las previsiones de los expertos, no es un fenómeno en disminución, sino que está en notable crecimiento. La intensificación de la población presente en la ciudad, y por lo tanto aumento de las construcciones necesarias, quitará espacio a las zonas verdes y naturales que tienden a atenuar y moderar las temperaturas. Si efectivamente, como se espera, no habrá una inversión de la tendencia desde este punto de vista, se espera un empeoramiento del efecto UHI, intensificando aún lo anteriormente descrito, con consecuencias que podrían ser desastrosas e irreparables para la humanidad, tanto en lo que respecta al presente, pero sobre todo para aquellos que habitarán nuestro planeta en las próximas décadas.

6.2.1 Cargas antropogénicas

Algunos estudios han demostrado que la energía requerida para el enfriamiento de un edificio de oficinas situado en el centro de Atenas es dos veces mayor que la misma fábrica localizada en la zona suburbana, con picos de demanda casi triplicados. (Santamouris, 2018).

Otros estudios muestran que las altas temperaturas urbanas afectan seriamente a la salud humana y tienen que ver con la mortalidad. Los habitantes de los barrios más cálidos tienen una probabilidad de morir por causas relacionadas con el calor urbano superior al 6% de los habitantes de los barrios más frescos (Santamouris, 2020).

Si ponemos el estudio precedente en unión con el siguiente, sale un escenario muy preocupante:

Se han llevado a cabo estudios sobre el comportamiento de los habitantes con ingresos más bajos que la media, con el fin de comprender si se pretendía utilizar correctamente los sistemas de refrigeración pasiva en el interior de las viviendas. Los resultados pusieron de manifiesto una falta sustancial de sistemas de aislamiento térmico y de inercia.

La combinación de la pobreza energética y la falta de disponibilidad de sistemas pasivos hace que estos hogares sean más vulnerables a la UHI en ciudades densamente pobladas. Esta situación lleva a estas clases de población a gastar el 40% de sus ingresos en gastos de explotación, superando en un 30% la media de la población europea (Akbari, 2015).

Por tanto, es muy importante introducir fuentes de energía renovables, como la solar térmica, los sistemas fotovoltaicos, la biomasa, etc. Esta tipología puede llegar a satisfacer casi totalmente las necesidades térmicas y eléctricas de las ciudades, razón por la cual es necesario favorecer políticas de aplicación de estas fuentes alternativas.

Parece claro, desde los resultados de los dos estudios, que, si un habitante débil tiene habitación en un barrio pobre o con faltas de diseño y soluciones

proyectuales adecuadas a la única situación, esos habitantes pueden sufrir de manera mayor las consecuencias de la UHI.

6.3 Materiales de construcción

Como se ha mencionado precedentemente, los “cool materials” son materiales que permiten al edificio de no absorber calor para que no lo emita en un segundo momento en la habitación como el entorno.

El efecto principal de los materiales fríos es la disminución de la radiación solar almacenada y luego emitida a la atmósfera gracias al aumento del albedo, con el fin de favorecer la disminución del flujo de calor sensible. Con la utilización de esta tecnología, se consigue una disminución de la temperatura superficial de unos 30 °C, mientras que, a nivel del contexto urbano, el uso de cool materials puede reducir tanto el pico como la media de la temperatura ambiente hasta 2,5K y 1 K, respectivamente (Kyriakodis, 2017).

Algunos investigadores han estudiado el comportamiento de los revestimientos fríos aplicados en edificios con condiciones climáticas diferentes: considerando 27 ciudades de todo el planeta, se ha examinado un edificio con techo plano con un solo nivel fuera de tierra; la reflectancia solar del techo de 0,85 dio lugar a una reducción de la temperatura máxima entre 1,2° y 3,7°C, evaluando las horas de incomodidad disminuidas entre el 9 y el 100%. Esta ventaja en el ámbito de las solicitudes de refrigeración, sin embargo, no se apoya en un comportamiento adecuado en los períodos en los que se necesita calefacción, ya que, debido a la disminución de la ganancia solar por las envolturas, estos últimos no pueden favorecer un cambio de calor adecuado a la temperatura invernal. El hecho de tener una reflectancia solar más alta que la de los materiales de construcción comunes permite a esta tecnología bajar la temperatura de la superficie, garantizando una duración del revestimiento mayor que la normal, ya que están sometidos a una menor fatiga térmica y degradación química que las envolturas tradicionales.

6.4 Materiales inteligentes

Según un estudio la aplicación de materiales fríos en edificios residenciales y comerciales puede suponer un ahorro de energía por enfriamiento de entre el 2% y el 44%, reduciendo su pico de energía requerido hasta un máximo del 35% (Haberl y Cho, 2004).

La investigación sobre materiales inteligentes en las dos últimas décadas se ha orientado en gran medida hacia el desarrollo de lo que se considera la unión débil de una fachada de construcción, es decir, los elementos transparentes, los cristales, que difícilmente logran obtener las mismas prestaciones de aislamiento térmico del edificio que la parte opaca, sobre todo por una cuestión de conformación y materiales. Debido a la tendencia al ahorro de energía, y consecuente intento de disminuir el uso de los climatizadores y otros dispositivos mecánicos, la investigación tecnológica sobre superficies acristaladas se centró en tipos de vidrio que permitieran una regulación equilibrada e ideal, también en relación con el lugar de intervención, la cantidad y la calidad de la luz que puede entrar en el edificio.

La investigación sobre los materiales inteligentes ha dado importantes resultados en cuanto a la parte transparente de las envolturas, pero no se ha detenido sólo en los vidrios. En efecto, para algunos tipos de materiales enumerados existen otras tecnologías, distintas de las soluciones acristaladas, que, con el mismo principio, proporcionan prestaciones capaces de adaptarse al contexto y a las temperaturas momentáneas. Por ejemplo, gracias al electrocromismo se fabrican pantallas de relojes, ordenadores portátiles, letreros informativos y espejos retrovisores contra el oscurecimiento; otros ejemplos pueden ser tintas, adhesivos y pinturas termocrómicas, etc.

6.4.1 Termocrómicos

Los estudios realizados (Ma et al, 2002) sobre la reflectancia solar de los revestimientos termocrómicos muestran que, una vez establecida una temperatura de transición de 20 °C, la absorción de energía solar es más elevada si descendemos por debajo de dicha temperatura, mientras que, por

encima de 20 °C, tendremos una absorción menor. En el caso de una exposición a la radiación solar de una hora en ambientes con una temperatura inferior a 20 °C, se ha demostrado que la energía solar absorbida por los materiales termocrómicos es comparable a la de los revestimientos coloreados; cuando la temperatura sea superior a 20 °C, la temperatura de los materiales termocrómicos será inferior a 4 °C.

(Neves R., 2001) llevó a cabo un estudio sobre pigmentos termocrómicos negros integrados en membranas textiles blancas que se utilizaban para las envolturas de edificios. La experimentación durante el período estival ha demostrado que, aunque la radiación solar tenía una incidencia mayor del 50%, el flujo térmico que pasaba a través de la membrana, que se volvió blanca gracias al sistema termocrómico integrado en ella, reducción del 7,7%. Investigadores (Granadeiro et al, 2020) han simulado el comportamiento térmico de una villa única compuesta por dos niveles fuera de tierra más un techo no practicable colocándola en tres ciudades: Oporto (Portugal), Madrid (España) y Abu Dhabi (Emiratos Árabes). La temperatura de transición es, para Oporto de 24 °C, mientras que para las otras dos corresponde a 23 °C. El estudio abarcó dos escenarios, el primer considerando del edificio sin posibilidad de calefacción, mientras que en el segunda era posible utilizar la calefacción y refrigeración mecánica para garantizar la temperatura de confort. En el primer caso, también llamado free-floating mode, se alcanza la mayor reducción de la temperatura interna en la ciudad de Madrid, pasando de 41,1° a 32,1° C (considerando el piso más alto del edificio). Por lo que se refiere al régimen invernal, el mayor aumento se observó, también en el mismo plano, en Abu Dhabi, pasando de 14,7° a 17,4° C. En general, resulta que, comparados con los revestimientos oscuros, los termocrómicos garanticen una reducción de la temperatura interna de 2,2 a 11 °C.

Teniendo en cuenta, por el contrario, el segundo escenario descrito por el estudio, los materiales termocrómicos garantizan ahorros de energía en cada una de las ciudades analizadas. Si se compara con las pinturas blancas, los ahorros en las ciudades de Oporto, Madrid y Abu Dhabi alcanzan, respectivamente, los 48%, 39% y 8%; considerando por el contrario los

ahorros energéticos relativos a la utilización de colores oscuros, conseguimos una disminución hasta los 20%, 26% y 50,6%. Parece que los edificios sin aislamiento térmico obtienen un mayor beneficio (del 2% al 8%) en términos de ahorro de energía que los edificios aislados térmicamente.

Por otra parte, los materiales termocrómicos presentan también defectos. El principal, y sobre todo el que se ha convertido en el mayor elemento disuasorio del uso de la tecnología termocrómica en el ámbito de la construcción, es sin duda la degradación del material polimérico después de haber estado expuesto durante mucho tiempo a la radiación solar, las variaciones de temperatura y las condiciones atmosféricas, incluidos los contaminantes. Con el tiempo, de hecho, podría haber una ruptura de la cadena de polímeros, y por lo tanto la alteración de las propiedades mecánicas y químicas, debido a la excesiva absorción de la radiación ultravioleta. En particular, se habla de propiedades como reflectancia y emisividad, es decir, dos de las características fundamentales de los materiales termocrómicos; esta disminución resulta más evidente en los materiales que inicialmente tienen una reflectancia mayor, pero tras una exposición prolongada, presentan una atenuación de la capacidad reflectante. Se ha demostrado que un revestimiento orgánico termocrómico sometido a exposición luminosa durante 50 horas presentaba una reducción de la densidad del color de alrededor del 60%; hay que señalar que dicho revestimiento no contenía ningún agente para mejorar su solidez a la luz.

Otro problema que se encuentra en los materiales termocrómicos utilizados en la construcción es el coste, actualmente muy elevado. Las ventajas a nivel de microclima urbano y de la eficiencia energética de los edificios impulsa hacia un estudio cada vez más profundo; Por lo tanto, la difusión de estos materiales en la industria de la construcción podría provocar una clara disminución de los precios y una mejora evidente gracias al ahorro de energía que conllevan.

7. Software utilizado

7.1 Envi-met

El software Envi-met nace gracias al compromiso de Michael y Daniela Bruse, actuales administradores de la fundación.

Este modelo micro climático permite simular las interacciones que existen en un entorno urbano predefinido entre superficies de edificios, vegetación, asfalto o suelos, y partículas de aire, teniendo en cuenta el contexto geográfico y las condiciones climáticas asociadas en el contorno.

El software permite crear modelos a nivel de microescala urbana (es más adecuado para esta solución que porciones de ciudades más grandes) y puede tener una resolución variable entre 0,5 y 10 metros. El modelo de cálculo es muy complejo e incluye:

- Flujos de radiación de onda larga y de onda corta, en todo el espectro, desde el infrarrojo hasta el ultravioleta, teniendo también en cuenta la sombra, la reflexión y la emisión de radiaciones, producidas por los edificios y por la vegetación;
- Transpiración, evaporación y flujos de calor sensibles al medio ambiente procedentes de la vegetación; Simulación completa de los factores físicos de las plantas, tales como la reacción de fotosíntesis y sus efectos;
- Temperatura de las superficies de la zona de simulación (edificios y suelo);
- Intercambios de calor y agua dentro del suelo;
- Cálculo de parámetros bio-meteorológicos como la temperatura media radiante y el PMV (Predicted Mean Value) de los usuarios del área en análisis;
- Dispersión de gases inertes y partículas y sedimentación en superficies y hojas;

- Corrientes de aire y turbulencias, datos de viento.

La multiplicidad de los factores de cálculo presentes en el sistema garantiza la posibilidad de utilizar Envi-met dentro de simulaciones que cubren diferentes campos de aplicación, como por ejemplo el estudio sobre el efecto de la UHI en las ciudades, de la vegetación en el entorno urbano, de las variaciones de los flujos de aire y de calor en relación con las modificaciones del contexto micro climático, pero también en estudios sobre la calidad del aire y la difusión de los contaminantes.

Para permitir la entrada de los datos de cada caso de estudio, Envi-met se divide en tres interfaces (Fig. 8): "Área", "Archivo de configuración" y "Base de datos". Estos componentes se agrupan en una única interfaz diseñada para realizar los cálculos a través de los modelos establecidos. Se obtendrán varios archivos de salida que se pueden leer y analizar utilizando dos interfaces adicionales.

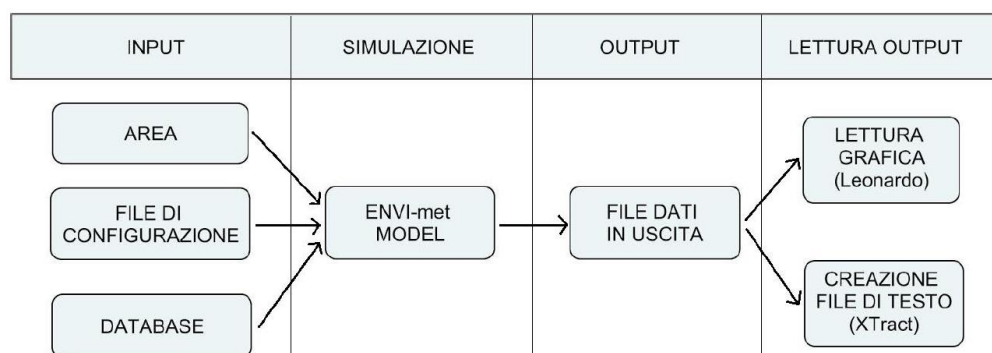


Ilustración 8 Diagrama de estructura del software Envi-met (Battistella, 2014)

7.1.1 Información de entrada

Las entradas de la simulación se dividen en las interfaces correspondientes "Área", "Archivo de configuración" y "Base de datos" e importadas a la interfaz de simulación, la cual, después de aplicar los criterios de cálculo, devuelve los datos a analizar.

La interfaz "Área" devuelve un archivo .INX, y expresa la representación gráfica bidimensional y tridimensional del modelo creado. La generación de este modelo se realiza mediante la definición de células que, transpuestas a la realidad, representan volúmenes finitos, en número y tamaño definidos. El tamaño a lo largo de los ejes x, y, y z de las celdas puede variar entre 0,5 y 10 metros, mientras que el número máximo de celdas es 250x250x30. Con precaución se pueden añadir anillas, es decir, una banda de celdas de contorno que delimitan la zona estudiada y que sirve para absorber la incidencia de las condiciones en el contorno. En este archivo encontramos información geométrica y cualitativa del modelo que desea simular, como:

- Tamaño del área (en forma de número y tamaño de cuadrículas)
- Edificios (altura, salientes y huecos) Espacios verdes (en el suelo y a gran altura)
- Tipo de vegetación
- Calles
- Tipos de suelo
- Presencia de espejos de agua.

En esta interfaz también se define el posicionamiento geográfico del modelo mediante la selección de la ciudad de la lista predeterminada en el software o incluso mediante la inserción de las coordenadas de latitud y longitud del lugar de intervención. Es posible visualizar gráficamente en tres dimensiones el resultado de la modelización efectuada, pasando al modo de visualización predispuesto.

El "Archivo de configuración", con extensión simx, contiene los datos de simulación, condiciones de contorno y datos adicionales del área modelizada; podemos resumirlos de esta manera:

- Fecha solar de inicio de la simulación
- Duración de la simulación (en horas)
- Hora de inicio de la simulación (el día indicado en el primer punto)

- Tiempo-paso de cálculo (es decir, el intervalo de tiempo al que el programa asocia la resolución de las ecuaciones)
- Datos relativos a los edificios (albedo y transcentro de las estructuras)
- Datos sobre el suelo (albedo, temperatura y humedad relativa de la superficie y a diferentes profundidades)
- Datos relativos al viento (dirección de procedencia, velocidad a 10 m del suelo, índice de rugosidad de la zona)
- Presencia de nubes en el cielo
- Posibles fuentes de gases o partículas inertes (dióxido de carbono tratado con vegetación) Opción relativo a la tipología de condiciones de contorno para el cálculo
- Modelos y condiciones de cálculo para turbulencias de aire
- Información estrictamente relacionada con la organización de los archivos relacionados con la simulación (enlace al archivo Área, nombres de la simulación y archivos de salida).

Las "bases de datos" son fundamentales para definir las características intrínsecas de los agentes que intervienen en la simulación. En esta sección es posible modificar las características de vegetación, paredes, partículas de aire, paredes y materiales relacionados, asfalto y terrenos con relativa estratigrafía. Puede modificar los parámetros fisicoquímicos de estos elementos y crear materiales y vegetación personalizados, diferentes de los predeterminados.

7.1.2 Interfaz de simulación

La interfaz de simulación es la sección del software que permite asociar al modelo creado los archivos de entrada que se han introducido, como las

características climáticas y temporales de la simulación. La interfaz, llamada "Envi-core" permite iniciar el desarrollo de los cálculos. Envi-core muestra al instante el desarrollo de los cálculos, de las indicaciones sobre el tiempo máximo de la simulación, proporcionando el porcentaje de avance y las horas que faltan al término, pero también da una retroalimentación en cuanto a la corrección del desenvolvimiento, señalando cualquier error en el desarrollo.

7.1.3 Archivo de output

Después de la simulación, se genera una carpeta de salida que, a su vez, contiene otras subcarpetas subdivididas según el ámbito de aplicación. Los archivos que se obtienen son legibles con programas de cálculo que permiten el análisis; sólo algunos se exportan como archivos de texto. Por lo tanto, se vienen a crear varias carpetas, tales como: Agents, atmosphere, buildings, Envi-objects, inflow, log, radiation, receptors, soil, solar-access, surface, vegetation.

- Atmosphere: Esta carpeta tiene dos archivos ATM por cada hora de simulación. Contienen, para cada altitud z correspondiente a una célula, informaciones relativas al viento (velocidad en las tres direcciones y total, dirección y variación porcentual de la velocidad), humedad relativa y absoluta, T del aire y media radiante. Estos archivos también contienen datos sobre el flujo de vapor, dióxido de carbono y otros contaminantes, en caso de que se introduzcan en el modelo inicial, además de información sobre la vegetación, el flujo incidente (directo, difuso y reflejado), factor de vista del cielo (que varía dependiendo de si se consideran sólo edificios o incluso la vegetación).
- Inflow: es la carpeta del modelo unidimensional de partida, utilizada por Envi-met como punto de partida para los cálculos. En este caso sólo hay un archivo por hora de simulación, dentro del cual hay información sobre parámetros a lo largo de una altura que, partiendo de 0 metros, llega a $z=2500$ metros, utilizando intervalos de espacio cada vez mayores. Los

parámetros de estas filas se refieren al viento y a los flujos de aire, respecto a los cuales es necesario disponer de más información, además de un valor de temperatura y humedad del aire. En particular, este valor de temperatura, en el punto más alto del modelo y en la hora de inicio de la simulación, coincide con el valor inicial impuesto en el archivo de configuración y varía de hora en hora según la radiación solar del modelo solar aplicado. Estos datos no son útiles para un análisis preciso y, por tanto, son indicativos, ya que el modelo al que se refieren es unidimensional y, como tal, no distingue los puntos del espacio más allá de la parte extrema del modelo tridimensional.

- La carpeta "Receptors" contiene los datos de los receptores establecidos en la plantilla. Este receptor proporciona datos sobre la columna de volumen por encima y por debajo de ella. Habrá datos atmosféricos, relativos al suelo y a los flujos radiactivos intercambiados. Estos datos se utilizarán para el análisis del modelo, en particular en cada punto y en toda su altura relativa.
- Soil, así como atmosphere, presenta dos archivos por cada hora de simulación, legibles a través de las dos interfaces de Envi-met dedicadas. De estos archivos se puede extraer información sobre las temperaturas superficiales del suelo y su contenido de agua hasta $z=-50$ metros.
- Surface se compone como soil y atmosphere, con dos archivos por hora de simulación, que contienen información sobre la altitud $z=0$ metros, es decir, archivos bidimensionales. De estos archivos se puede obtener información de temperatura superficial variable en el tiempo, humedad relativa y velocidad del viento.

7.1.4 Herramientas para leer las salidas

La interfaz para extraer los datos de salida de la simulación de Envi-met es Leonardo. A través de esta interfaz se puede obtener la lectura gráfica de los archivos mencionados anteriormente. Para realizar un análisis adecuado, debe importar uno de los archivos de salida y seleccionar la representación más adecuada para cada uno. La visualización de los datos de Leonardo se realiza

con cuatro tipos de capas diferentes: fecha, vector, special, isoline. Se pueden visualizar de forma individual o simultánea. El primero permite una diferenciación cromática acompañada de una leyenda, útil para evaluar el gradiente de temperatura entre las rejillas. La capa "vector" expresa el dato asociado a través de flechas (vectores, precisamente) y un módulo que representa el valor numérico, a menudo utilizado para el flujo de aire y el viento. La capa "special" proporciona indicaciones sobre la presencia de edificios y vegetación dentro de la representación gráfica de los otros parámetros. Isoline, por último, permite la visualización de las isolíneas que representan diferentes parámetros como factor de visión del cielo, temperaturas, flujos radiantes accidentales y velocidad del viento. Definiendo los parámetros a mostrar, Leonardo permite elegir el plano de visualización en el que se muestran los datos, horizontal xy definiendo la altitud z, o verticales xz o yz estableciendo las coordenadas respectivas de y o x. Es posible, Por lo tanto, mostrar los datos de todos los puntos del espacio.

7.1.5 Limitaciones de software

Envi-met es un software que permite realizar simulaciones energético-ambientales de zonas urbanas, devolviendo un número muy elevado de datos. Estas simulaciones son muy complicadas y se basan en un modelo de cálculo que tiene en cuenta varios factores que influyen mutuamente. Es necesario, pues, que el software se sirva de simplificaciones, en particular en el momento de la modelización, y por lo tanto están relacionadas con la creación del archivo "Área". Sin duda, la mayor simplificación se refiere a la resolución del modelo, que permite la visualización de los elementos creados, edificios y plantas, sólo como cubos derivados de las grids. Resulta evidente que los elementos más pequeños en comparación con las rejillas son los más perjudicados por este tipo de aproximación porque serán sobreestimados en volumen, e influyendo en los cálculos de los flujos de aire y radiactivos, impidiendo una correcta representación de la realidad.

Otra limitación bastante importante es la relativa a la altura del suelo. De hecho, resulta imposible crear diferentes altitudes dentro del mismo modelo, restringiendo la simulación a zonas de altimetría fija o muy similar, sin desniveles importantes como colinas o montañas. Del mismo modo, es imposible modelar desniveles entre calles, edificios y rampas que, en realidad, pueden crear importantes variaciones de flujos de aire y zonas de sombra que, por lo tanto, hay que olvidar.

Otro efecto que no se puede reproducir es el derivado de la presencia de fuentes o movimiento del agua. Este tipo de limitación no es fundamental, pero podría ser una característica a tener en cuenta. La presencia de estanques o fuentes de agua puede tener efectos sobre la temperatura del aire debido a la presencia de agua nebulizada en el aire, provocando un descenso de la temperatura del aire. Durante las horas diurnas se observan los efectos de eventuales fuentes, mientras que las cuencas de agua favorecen el enfriamiento nocturno, en particular después del atardecer.

En cuanto a los resultados que se pueden obtener, el límite se refiere al receptor, que no puede colocarse en un edificio, sino únicamente en el nivel del suelo, es decir, a cero. En el caso de que estén colocados en el edificio, los receptores no garantizan el suministro de datos atmosféricos por encima de la altura del techo, ya que el programa los lee como si estuvieran cubiertos por el propio edificio.

Un obstáculo a la modelización correcta es el relativo a la imposibilidad de modificar las variables de entrada durante el día, variación que habría sido fundamental para una correcta modelización de los materiales termocrómicos y que se retomará en los próximos capítulos, donde, describiendo el caso del estudio, se definirá la aproximación utilizada.

La última limitación se refiere a los archivos de salida y su modo de lectura. Leonardo, la interfaz para la interpretación de datos, permite el análisis de un archivo horario a la vez o, a lo sumo, una comparación entre dos archivos horarios diferentes; además, este análisis se realiza examinando un solo parámetro a la vez.

En conclusión, podemos afirmar que Envi-met es un software con muchas potencialidades, utilizado principalmente en simulación que prevén el estudio de la incidencia de la vegetación en el microclima, para comparar el comportamiento del mismo sistema en diferentes condiciones de vegetación y en los estudios de posibles modificaciones para atenuar el efecto de la isla de calor en términos de la variación de la arboleda de las superficies e introducción de vegetación.

7.2 El caso de estudio

7.2.1 Modelado en Envi-met

La modelización del caso estudio del presente elaborado se ha realizado utilizando el software Envi-met 4.4.5, elegido por la variedad de factores que tiene en cuenta para la modelización y sobre todo por las características de análisis que se refieren a la atenuación de la UHI

El primer paso que hay que dar es, sin duda, crear un modelo tridimensional georreferenciado que represente el ámbito de intervención. el caso estudio se eligió en correspondencia de la estación meteorológica de ARPA (Agencia Regional para la Prevención y la Protección del Ambiente) Apulia presente en Corso Cavour, en Bari (Italia) porque proporciona datos climáticos muy

precisos y útiles para el estudio que se pretende realizar. La zona considerada cubre la zona central del barrio Murat de Bari (Fig 9).

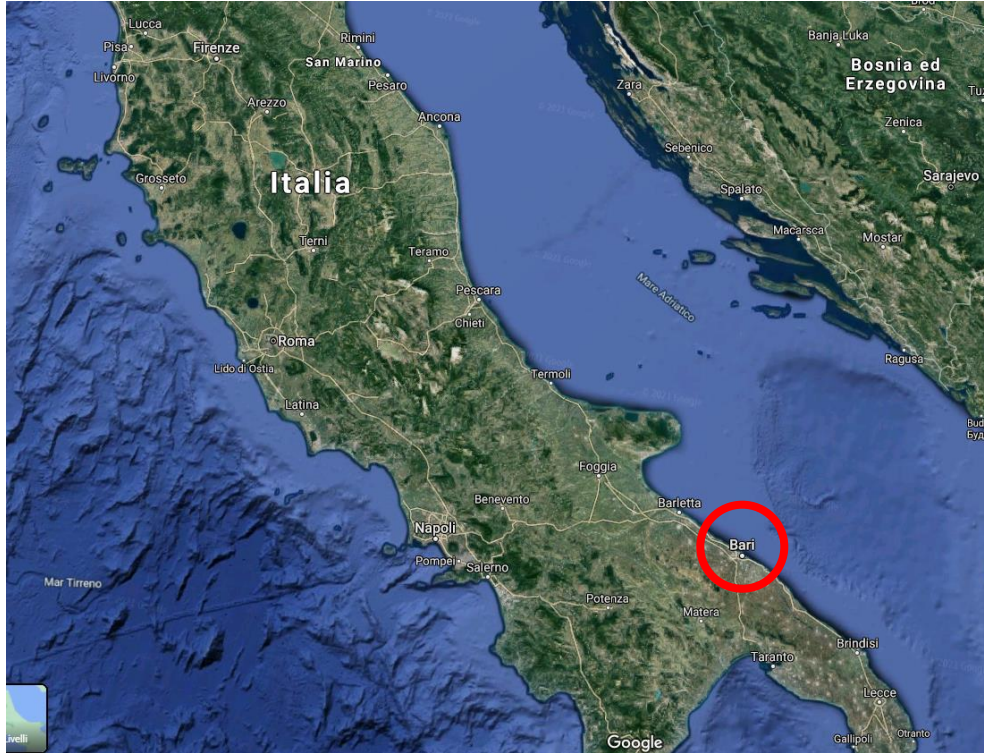


Figura 9 Mapa de Italia (Google Maps)



Figura 10 Zona de barrio considerada (Google maps)

El área (Fig.10) tiene una extensión de 30360m² (185x165 m) y en su interior encontramos cinco edificios y dos zonas verdes. Para el desarrollo vertical, se

ha optado por terminar el modelo a una altura doble de la del edificio más alto (45m), tal como sugiere el equipo Envi-met, con el fin de dar estabilidad a los modelos matemáticos y a los análisis que se efectuarán, pero también para evitar posibles valores que pueden desviar los análisis. La elección del número de rejillas ha recaído sobre 62x58x20 rejillas, cada una de las cuales tiene dimensiones $dx=3m$, $dy=3m$, $dz=5m$. De este modo se ha intentado no sobrecargar el modelo, ya que una representación con un número de rejillas mayor o con un tamaño de rejillas menor habría sobrecargado mucho el cálculo efectuado por el ordenador, alargando aún más los tiempos de simulación; al mismo tiempo se ha intentado, utilizando las rejillas de 3m, obtener un modelo lo más preciso y fiel posible. El software también prevé la inserción de las redes nesting, útiles al programa para evitar errores durante las simulaciones en caso de que hubiera edificios en correspondencia con las rejillas más externas. Envi-met, por último, recoge todos estos datos en una única interfaz con varias tarjetas en la Fig. 11-12-13.

La rotación con respecto al Norte se introdujo tras el análisis del mapa facilitado por Google Maps, obteniendo una inclinación de 6° hacia el Oeste.

The screenshot shows a software interface titled "Change or create model domain settings". On the left, there is a vertical menu with several options: "Model Location", "Model Geometry", "Georeference and DEM Level", "Default Settings", "Nesting Grids", and "Description and Copyrights". The "Model Location" option is currently selected and highlighted. The main area of the interface is titled "Location on earth" and contains several input fields and a button. The "Name of location:" field contains the text "Bari, Metropolitan City of Bari, Italy". Below it is a "Find location..." button. The "Position on earth:" section includes two fields: "Latitude (deg. +N, -S):" with the value "41.12" and "Longitude (deg. -W, +E):" with the value "16.87". The "Reference time zone:" section includes two fields: "Name:" with the value "Central European Standard Time" and "Reference longitude:" with the value "15.00".

Figura 11 Interfaz Envi-met; datos de georreferenciación

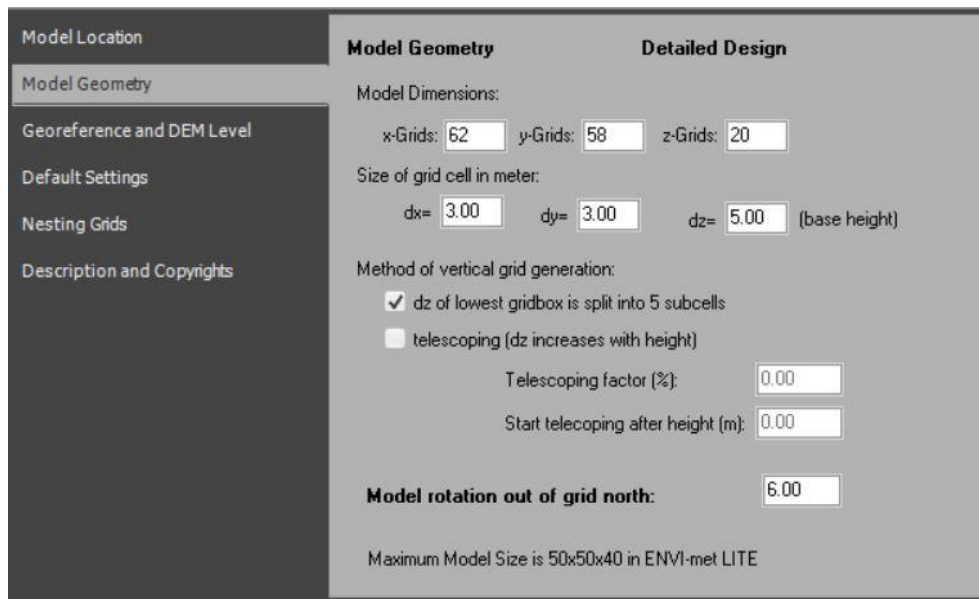


Figura 12 Interfaz Envi-met; Datos relacionados con las cuadrículas

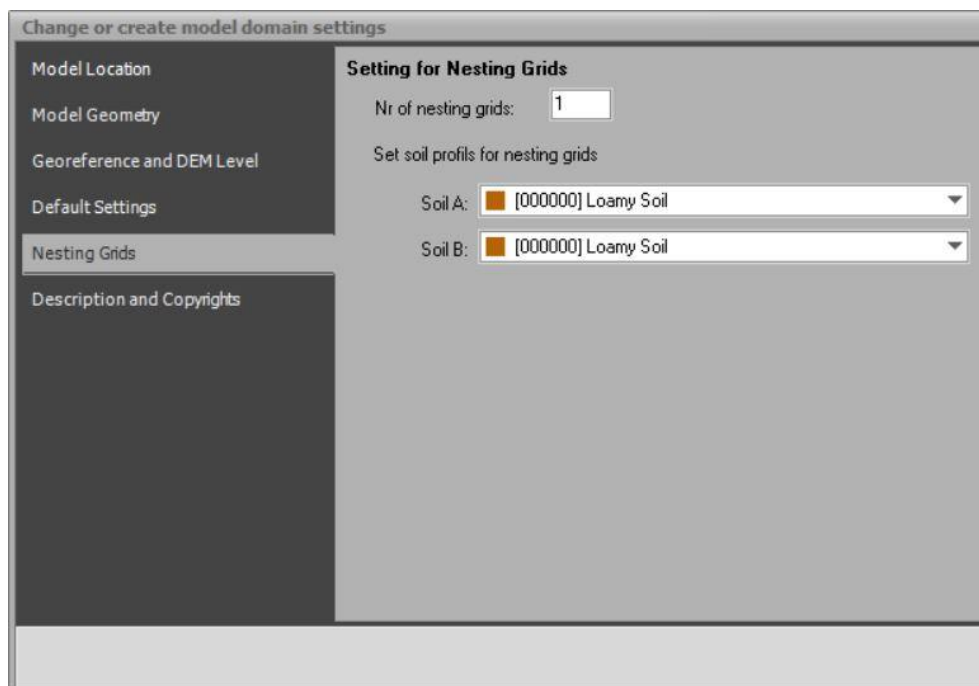


Figura 13 Interfaz Envi-met; Datos relacionados con las cuadrículas anidadas

El siguiente paso el modelado del caso de estudio, primero 2D y luego 3D. Primero, se creó un archivo. bmp (mapa de bits) de la zona objeto de la intervención (Fig. 14) para tener una guía en el posicionamiento de los edificios, de la vegetación y para la representación de asfalto y aceras.



Figura 14 Mapa de bits del área en estudio

Sucesivamente, en la representación 2D, fueron agregados los edificios con sus alturas, la vegetación presente, el asfalto y las aceras. Para definir la altura de los edificios, fue muy útil el uso de Google Earth Pro, que tiene una herramienta que puede devolver la altura requerida en la visualización 3D. Gracias a esta funcionalidad ha sido posible deducir las alturas con más precisión, ya que un método alternativo habría sido aproximar las alturas de interplano entre pisos en relación con el período de construcción del edificio mismo, cálculo que habría sido muy aproximado y por lo tanto habría proporcionado datos poco exactos. Dado que Envi-met solo utiliza cantidades enteras para la altura de los edificios, las alturas observadas también se han aproximado al conjunto anterior, si el valor medido tiene decimales inferiores a 0,5 m, al resto. A continuación, se muestra el mapa y la representación en dos y tres dimensiones del software Fig15-16-17.



Figura 15 Mapa objeto de intervención

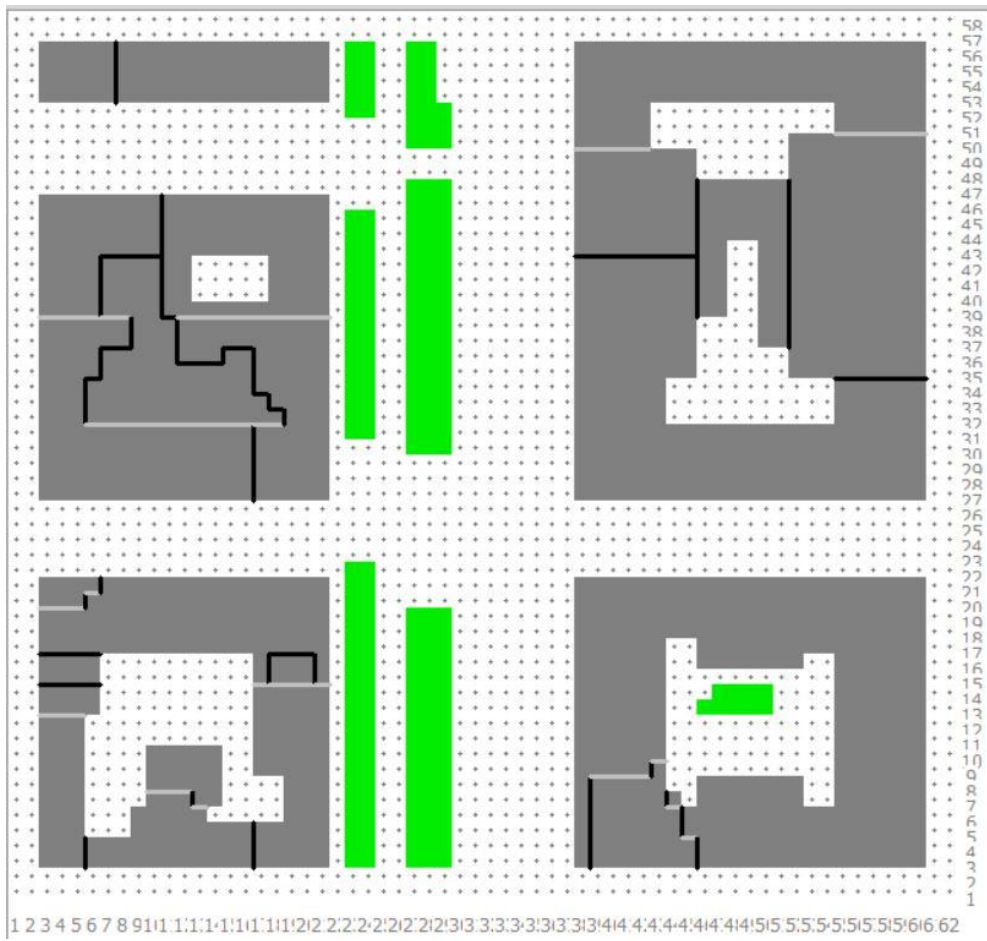


Figura 16 Representación 2D del área de archivo de entrada

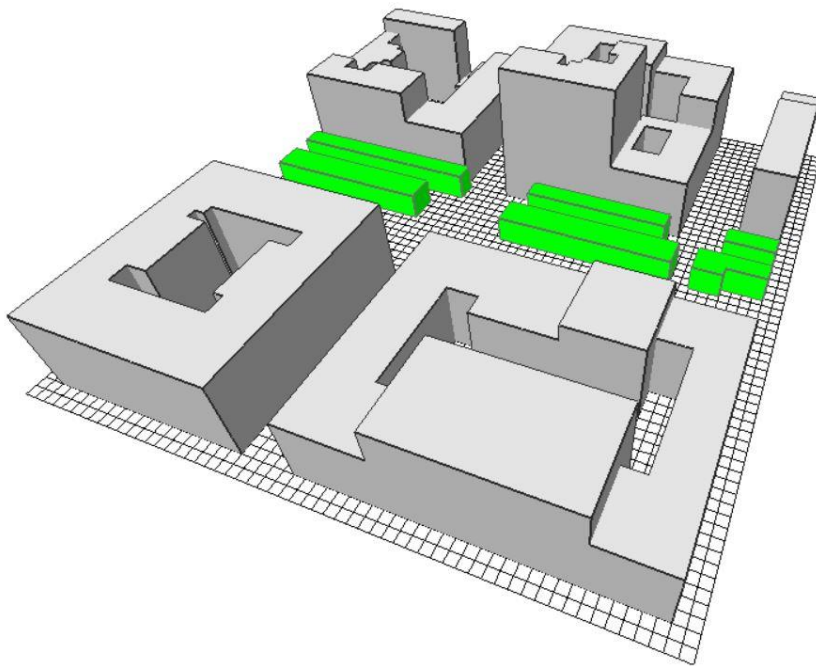


Figura 17 Representación 3D del área de archivo de entrada con Envi-met

Como se puede ver en la Fig. 17, no hay ventanas ni superficies transparentes en la representación gráfica, ya que se ha estimado que su impacto en el modelo y en la posterior simulación de fluidos es insignificante.

7.2.2 Elección de materiales y vegetación

Otro paso fundamental para conseguir una simulación muy similar a la situación real es definir las características de los materiales que componen el modelo, desde la estratigrafía de los edificios a la vegetación presente, sin olvidar el asfalto y las aceras.

Para estos dos últimos, se han seleccionado materiales por defecto, ya presentes en la biblioteca de materiales de Envi-met. Como se muestra en la Fig. 18, Envi-met pone a disposición para cada elemento presente dentro del modelo, una serie de variantes tipológicas, es decir, materiales con diferentes características que pueden representar, más o menos fielmente, el material en realidad presente o que realmente se quiere utilizar en el diseño real. Existe también la posibilidad de definir materiales nuevos, distintos de los presentes por defecto, que estén más cerca de los valores característicos de los elementos reales elegidos para el diseño.

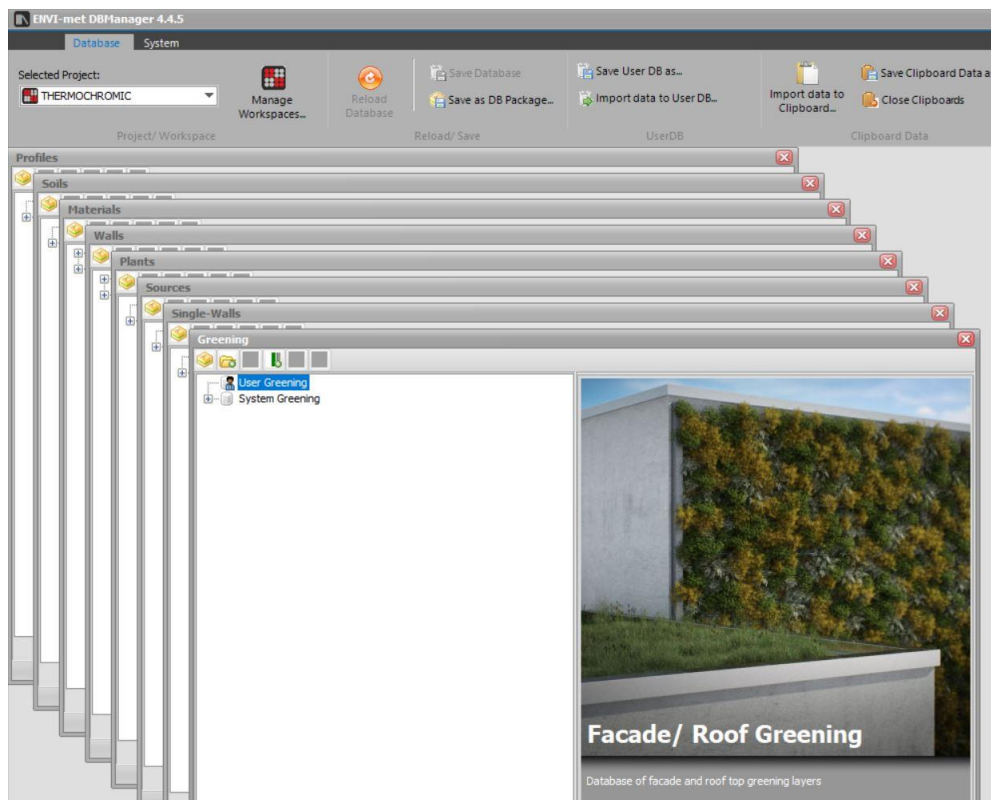


Figura 18 Gestor de bases de datos Envi-met. Interfaz para editar o crear materiales

Por lo que se refiere al asfalto y al andén del modelo creado para la evaluación del caso, se han utilizado los materiales por defecto presentes en la sección, respectivamente:

Profiles Roads&pavements [0100ST] Asphalt Road

Profiles Roads&pavements [0100PL] Concrete Pavements Light.

También para la vegetación, que es de la misma naturaleza en la zona analizada, se ha utilizado un material por defecto presente en la sección:

Legacy Hedges and others [0000T1] Tree 10 m very dense, leafless base.

La elección más importante se ha hecho en lo que se refiere a los edificios, en particular la estratigrafía de los tabiques y los valores de los parámetros térmicos de los materiales seleccionados.

Con el fin de representar de la manera más realista y fiel posible las estratigrafías, se ha tenido en cuenta la Norma UNI TR 11552:2014 "Ábaco de las estructuras que constituyen la envoltura opaca de los edificios.

Parámetros termo-físicos". Se ha optado por esta opción porque, dada la falta de información detallada sobre los componentes de las estructuras, esta norma ofrece las principales características y estratigrafías utilizadas en los edificios existentes, distinguiendo además de las modalidades constructivas, asociadas a la época de construcción, incluso por su distribución geográfica.

La elección ha recaído sobre dos tipologías de estratigrafía, diferentes puesto que existen dos tipologías de edificios en el área de intervención, que datan de épocas distintas y por lo tanto con modalidades constructivas igualmente variadas. La estratigrafía de los edificios más recientes, que se remonta a los años 70, consiste en yeso interior y exterior, y un bloque de ladrillo semilleno considerado de 25 cm (Fig. 19). Entre los edificios más recientes no se han tenido en cuenta las diferencias de color externas, pero se ha considerado oportuno homogeneizar todo utilizando el color gris, que prevalece en la realidad, para simplificar la generación del modelo y el posterior cálculo termodinámico realizado por Envi-met.

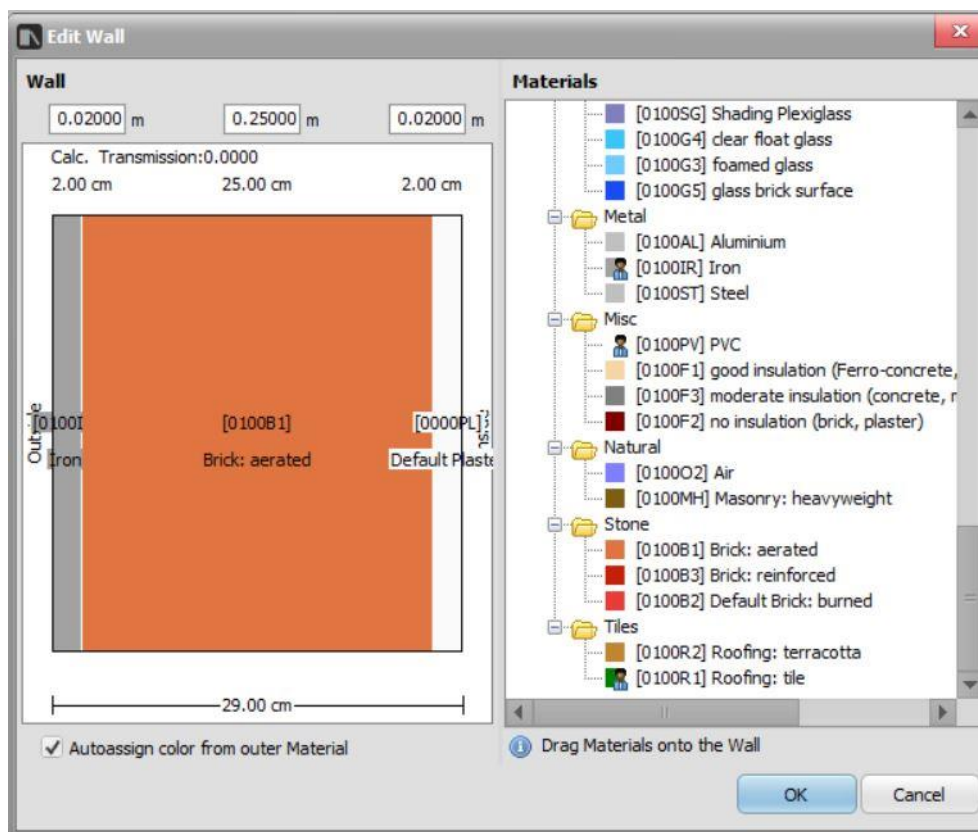


Figura 19 Albañilería de ladrillos; Editor de pared Envi-met

Para los edificios más antiguos, construidos aproximadamente en los años 20-30, se ha identificado la estratigrafía compuesta de yeso y bloques de toba, como se muestra en la figura. 20

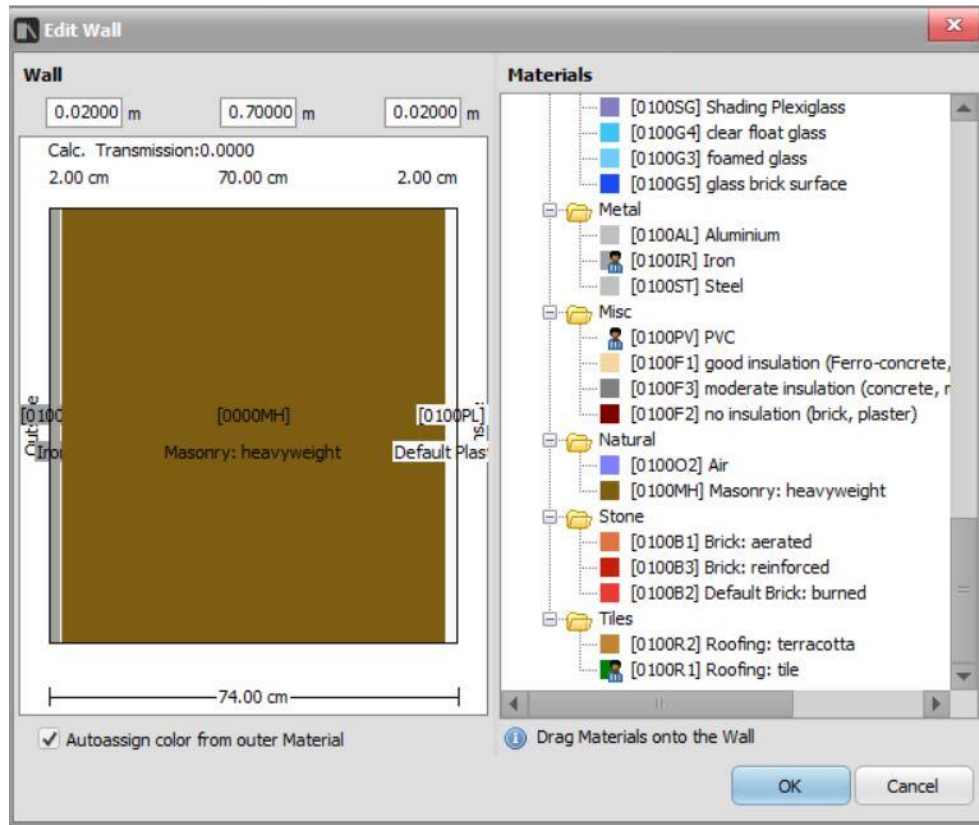


Figura 20 Mampostería de toba; Editor de pared Envi-met

Por lo que se refiere a los materiales individuales, se han utilizado principalmente materiales por defecto ya presentes en las librerías, excepto para los materiales que componen la estratigrafía externa de cada tipo de cierre. Para estos últimos, fue necesario modificar los valores de reflectancia, absorción y emisividad de los materiales por defecto que tenían valores de estos parámetros más similares a los decididos en la fase de análisis y estudio de los termocrómicos. En particular, es necesario señalar que, por lo que se refiere a la capa exterior de la estratigrafía existente, la elegida era el único material ya presente en las librerías con valores de reflectancia y absorción correspondientes con buena aproximación al valor decidido. La modificación sustancial, en este caso, se refería al valor de emisividad, que resultaba ser demasiado bajo en comparación con el valor real. La asignación de materiales

termocrómicos de la librería fue más fácil, ya que los valores de reflectancia y emisividad buscados se correspondían con el programa. Es muy importante destacar una aproximación que se hizo en el momento de la simulación. Envi-met no ha permitido en modo alguno realizar un análisis adecuado y real del comportamiento de los materiales termocrómicos durante un día tipo, ya que no puede simular el cambio de los valores asignados a los materiales al cambio de temperatura. Bajo el consejo de otros expertos (del Foro Oficial Envi-met y de otros investigadores) se acordaron dos tipos de simulaciones dinámicas:

- La primera considerando los datos del día más frío del año examinado, utilizando los valores y las características superficiales y físicas del caso termocrómico coloreado (verde).
- El segundo caso tuvo en cuenta el día más caluroso del año, incluyendo, contrariamente al caso anterior, los valores de reflectancia, absorción y emisividad de la casuística estival (blanca).

7.2.3 Simulaciones

Último paso antes de analizar los resultados es crear los archivos de configuración. Después de seleccionar el proyecto y la carpeta de origen, se deben introducir los datos relativos al día en que se desea realizar la

simulación, la hora de salida y la duración de la simulación, como se muestra en la Fig. 21.

ENVI-guide

GENERAL SIMULATION SETTINGS

Start and duration of model run

Start Date (DD.MM.YYYY): 18.12.2017

Start Time (HH:MM): 00 00

Total Simulation Time (h): 72

Basic names and folders

Full name of simulation task: 18-12-17_72H
This is used to identify your simulation and to generate labels

Short name for file name generation: 18-12-17_72H
Define the root name for your simulation files.
ENVI-met will add some information to this name, so keep it simple but unique

Base folder for model output: 18-12-17_72H_output

< Back Next >

Figura 21 Interfaz de entrada de datos de simulación Envi-met

En particular, el análisis que se llevará a cabo para el desarrollo del presente trabajo está estructurado de manera que se realicen dos simulaciones, el día más frío y el día más caluroso del año. Para ello, ha sido indispensable utilizar los datos climáticos proporcionados por el sitio web del Arpa Puglia que, entre otros, proporcionan datos relativos a temperatura, viento, humedad relativa, precipitaciones, radiación solar. Debido a posibles fallos en la estación meteorológica, los datos correspondientes a los años 2018 y 2019 muestran varias semanas de ausencia de datos, por lo que se eligió como período de análisis el año 2017, siendo el más completo desde el punto de vista de los datos climáticos. Tras analizar estos datos, se constató que el día más frío era el 19/12/17, con una temperatura media mínima de 3,2 °C durante las primeras horas de la mañana, mientras que el día más caluroso del año resulta ser el 24/07/17 con una temperatura media máxima de 37.1°C que se desarrolla en las horas de la tarde, las más calientes del día. La configuración

dada al software con respecto a las horas a simular prevé que se analicen las 72 horas siguientes a la medianoche del 18/12/17 y a la medianoche del 23/07/17, a pesar de que, como se ha dicho antes, los días analizados son el 19/12 y el 24/07. La elección de incluir en la simulación el día anterior y posterior a los días antes mencionados viene determinada por dos razones: se eligió el día anterior porque el software necesita 48h para ir a régimen. Por otro lado, al realizar una simulación de menor duración, no impediría analizar con precisión los efectos dinámicos en los parámetros analizados. En efecto, para tener en cuenta los intercambios dinámicos de calor en el interior del árido urbano, es necesario que la simulación dure al menos 48 horas, ya que al inicio de la simulación todas las superficies están a la misma temperatura preestablecida por Envi-met. A medida que absorben y liberan radiación solar, empiezan a activarse mecanismos de intercambio de calor que necesitan 48 horas para funcionar. La elección de analizar otras 24 horas se debe al hecho de que el fenómeno de la UHI desarrolla más sus efectos con un retraso de aproximadamente un día.

Después de definir los datos horarios, el programa pide que el nivel de dificultad que se quiere establecer para la simulación que queremos realizar, principiante, intermedio o avanzado; esta elección implica la inserción de más o menos variables. Para el caso que nos ocupa se puede utilizar una simulación a nivel principiante ya que los datos adicionales (nubosidad, contaminación, asfalto, temperaturas interiores de los edificios, condiciones especiales de la vegetación, etc.) que se requieren en los niveles de simulación más altos son desconocidos o no influyen en el nivel de los datos de análisis que se desea obtener. En los pasos siguientes el software permite la inserción manual de los valores máximos y mínimos de temperatura y permite la inserción de la velocidad y de la dirección del viento. El último paso fue utilizar la interfaz de Envi-met dedicada al análisis de datos, es decir, Leonardo.

7.3 Estructura de los análisis

El software Envi-met utilizado para simular comportamientos termofluidodinámicos en las condiciones establecidas también nos proporciona una interfaz dedicada, llamada Leonardo, destinada únicamente a la extrapolación de datos para analizar. Por ejemplo, algunos de los datos que se pueden evaluar a través de esta conexión de Envi-met son la velocidad, la dirección del viento y su variación de la intensidad porcentual; también se puede evaluar la temperatura, su cambio diario y horario, humedad relativa y específica, radiación solar directa, difusa y reflejada además de muchos otros parámetros. El análisis de los datos obtenidos a través de las simulaciones se centró en particular en los parámetros de temperatura del aire y velocidad del viento, es decir, dos elementos que pueden relacionarse entre sí y que: además, desempeñan un papel principal en el desarrollo de la UHI.

Una función importante de Leonardo es comparar los datos entre los dos archivos horarios seleccionados. Para este trabajo ha sido muy importante esta funcionalidad ya que ha permitido comparar los resultados obtenidos a través de la simulación del caso de partida con materiales con propiedades comunes y las simulaciones de los dos casos efectuadas insertando los valores de reflectancia y emisividad asociada a los materiales termocrómicos.

Tras una atenta evaluación de los datos y de las particularidades aportadas por dicho análisis, se ha procedido a una lectura crítica de los mismos, evaluando cuáles son las motivaciones que implican la presencia de la isla de calor en las zonas urbanizadas: distribución geométrica de los edificios y de la ciudad, altura de los mismos con posible evaluación del efecto cañón que se podría crear, presencia o ausencia de vegetación lista para crear zonas de sombra y favorecer la evapotranspiración, presencia o ausencia de blindaje que ayude a disminuir la velocidad del viento, evaluando si esta disminución puede ser una ventaja o una desventaja, estratigrafía de los edificios.

Al final de todo el trabajo, incluyendo la fase de investigación, profundización y aprendizaje de los conceptos proporcionados por los

artículos científicos, estudio y ejercicio del software, a los que siguió el análisis de los resultados obtenidos, y gracias a la visión global final de la situación examinada, se han podido llegar a conclusiones basadas en los conocimientos adquiridos anteriormente y se ha evaluado si el comportamiento obtenido en este contexto es adecuado y adecuado para dichos estudios.

8. Análisis de los resultados

Se ha creado el modelo de una zona de la ciudad de Bari utilizando el software Envi-met 4.4.5. Gracias a su funcionalidad, ha sido posible realizar simulaciones de temperatura interna y fluidodinámica que devuelven las variaciones de diferentes parámetros térmicos a lo largo de un día. Por lo que se refiere a la aplicación de los termocrómicos, se ha hecho indispensable incluir dentro de la base de datos de los materiales de Envi-met dos elementos distintos necesarios para la simulación del caso estudio con los materiales termocrómicos. Esta acción se ha llevado a cabo teniendo en cuenta un límite del software, es decir, que no puede variar los valores de los parámetros térmicos de los elementos que componen las estratigrafías albañiles durante la misma simulación. De este modo se perdería la característica bisagra de los materiales termocrómicos, es decir, el cambio cromático en el momento en que se pasa una determinada temperatura, que implica una variación del albedo. Por esta razón, fue necesario crear un segundo material que tuviera las características del termocrómico en el caso de la variación cromática.

El análisis de los resultados se centró en la zona central del modelo creado, evitando evaluar los parámetros, en particular en la parte de los edificios, los bordes y las zonas adyacentes a los mismos. El sector seleccionado incluye dos porciones cubiertas por árboles, una zona central libre de obstáculos tanto en la parte superior como en la inferior, y cuatro edificios, dos en el lado derecho y dos en el lado izquierdo, separados horizontalmente por una carretera de unos 20 metros de ancho y verticalmente por una carretera de unos 50 metros de ancho.

8.1 Análisis del caso base de referencia

El término caso base se refiere al modelo original que representa el estado no mitigado, y con buena aproximación indica el estado de los lugares. La capa más externa que compone la estratigrafía tiene como valor de reflectancia la media de los valores del material termocrómico, o sea 0,62; por consiguiente, el valor de absorción de calor se eleva a 0,38. Sin embargo, el valor de emisividad se ha establecido en 0,9 (Fig. 22).

	EXISTENTE	TERMOCROMICOS	
		BLANCO	VERDE
REFLECTANCIA	0.62	0.73	0.51
ABSORCION	0.28	0.27	0.49
EMISIVIDAD	0.89	0.88	0.9

Figura 22 Tabla de resumen de valores de los materiales utilizados

Como ya se ha explicado, se ha optado por analizar el comportamiento de la porción de territorio seleccionada en el día más frío (19/01) y más caliente (24/07) del año 2017. En particular, el análisis se realiza en los días siguientes, ya que se supone que hay un mayor desarrollo del efecto de UHI.

8.1.1 Análisis del 20/12 a las 06

El primer análisis efectuado se centra en las consecuencias que tiene el día más frío sobre la ciudad, luego se evalúa el caso de las 6:00 horas del 20/12/17. Los dos parámetros analizados son, en particular, la temperatura del aire y la velocidad del viento, dos parámetros muy importantes para el origen de la UHI.

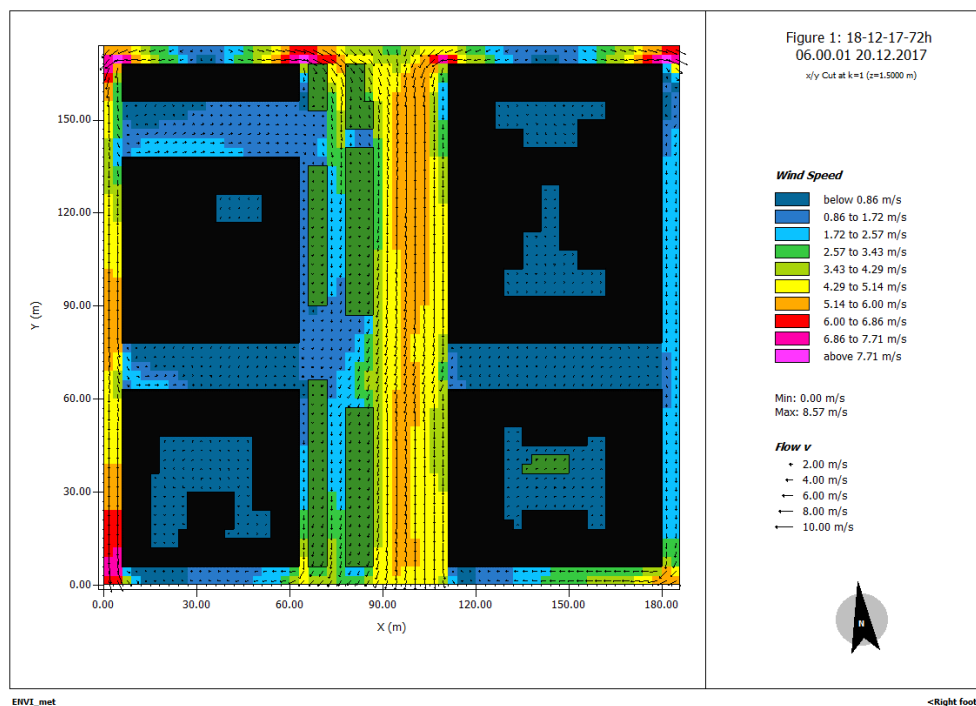


Figura 23 Velocidad del viento (20-12 a las 06) usando Leonardo (Envi-met)

Se ha decidido analizar como primer parámetro la velocidad del viento (Fig. 23), ya que ésta puede tener consecuencias que se correlacionan sucesivamente con los valores de temperatura del aire.

La primera diferencia sustancial, pero también más evidente, es la velocidad del viento en la banda central del modelo. Como se puede ver en la Fig.24, esta porción tiene un color mucho más cálido, completamente diferente del resto de la zona, predominantemente azul. Este cambio de color significa una diferencia de velocidad del viento en la zona central y, según la escala de representación utilizada, el valor de este parámetro oscila entre 4,30 m/s y 6,00 m/s. La motivación que se ha dado a esta diferencia se refiere a la morfología del modelo. De hecho, en la Fig.25 se pueden distinguir en negro los edificios presentes en realidad en la porción dibujada, así como en verde oscuro, en el centro izquierda, notamos los árboles presentes.

Analizando la disposición de los edificios y de la vegetación, se encuentran exactamente en la zona lateral con respecto a la franja central donde el viento

sopla con mayor velocidad. Esta conformación crea un espacio totalmente libre de blindaje donde el viento puede aumentar su velocidad en comparación con otras zonas. Para reforzar este argumento se ha tomado como ejemplo tanto la zona adyacente en la que están presentes los árboles como la zona en la que están situados los edificios. Es evidente en este caso que el viento disminuye sustancialmente su velocidad en presencia de obstáculos. También hay que notar la dirección del viento, que en este caso se dirige principalmente hacia el Sur, pero luego se desvía hacia el lado Oeste. Como se ha dicho antes, hay una correlación entre la temperatura del aire y la velocidad del viento. Este supuesto es evidente si se mira en la Fig. 26 la temperatura del aire. En particular, deteniéndonos en la última porción analizada, la del lado izquierdo en correspondencia con las dos áreas arboladas, se nota que la disminución de la velocidad del viento implica un aumento de la temperatura, tratándose de viento procedente del norte.

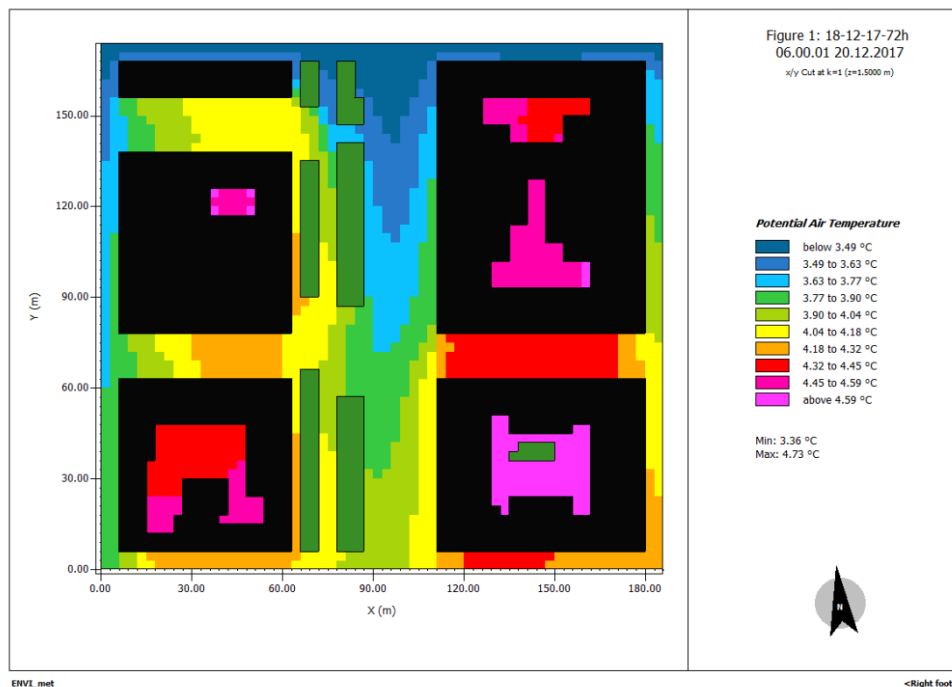


Figura 24 Temperatura del aire (20-12 a 06) usando Leonardo (Envi-met)

Cuando analizamos la parte horizontal del modelo entre los dos edificios de la derecha y los dos de la izquierda, vemos que nos encontramos en una situación en la que la velocidad del viento es prácticamente nula, como muestra la Fig. 25. Se produce un aumento de las temperaturas no indiferente con respecto a la banda central. La ligera diferencia de temperatura se justifica por la diferencia de velocidad del viento entre el lado derecho y el izquierdo: en el primero el viento está casi ausente, es decir, temperatura más alta; en el lado opuesto de la dirección del viento hacia la izquierda y la mayor intensidad genera un aumento de calor sólo en el área interior, menos afectada por la ventilación.

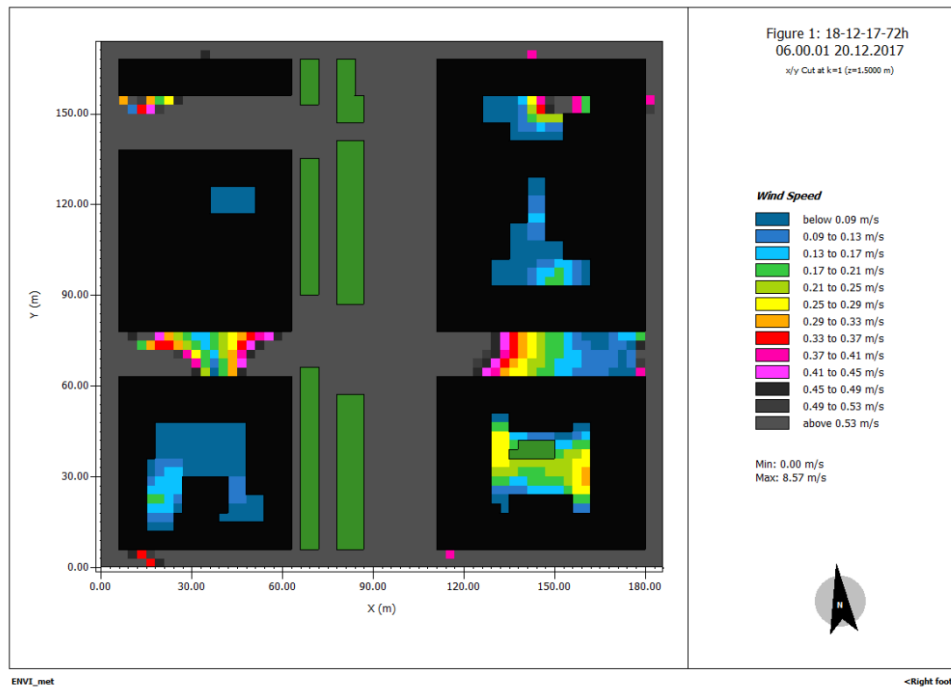


Figura 25 Detalle de la velocidad del viento entre los edificios (20-12 a las 06) usando Leonardo (Envi-met)

Otra razón por la cual la temperatura en esta porción específica podría ser mayor es la diferencia de estratigrafía entre los edificios de la derecha y los de la izquierda. Mientras que los primeros están compuestos en ladrillo del grueso de 25 cm y yeso, los dos edificios del lado derecho están compuestos por una capa de toba mucho más gruesa (70 cm) y yeso. Esta diferencia implica una diferente capacidad de inercia térmica, que puede repercutir de

esta manera, teniendo en cuenta también que la anchura de la carretera que divide los dos edificios es menor de 20 metros.

8.1.2 Análisis del 20/12 a las 15

En cuanto a los análisis realizados a las 15.00 h del 20/12, siempre en la casuística del día más frío, se puede observar de la Fig. 26 que la situación que se presenta al evaluar el solo parámetro de la velocidad del viento es muy similar a la descrita anteriormente, relativa a las 06.00 horas del mismo día.

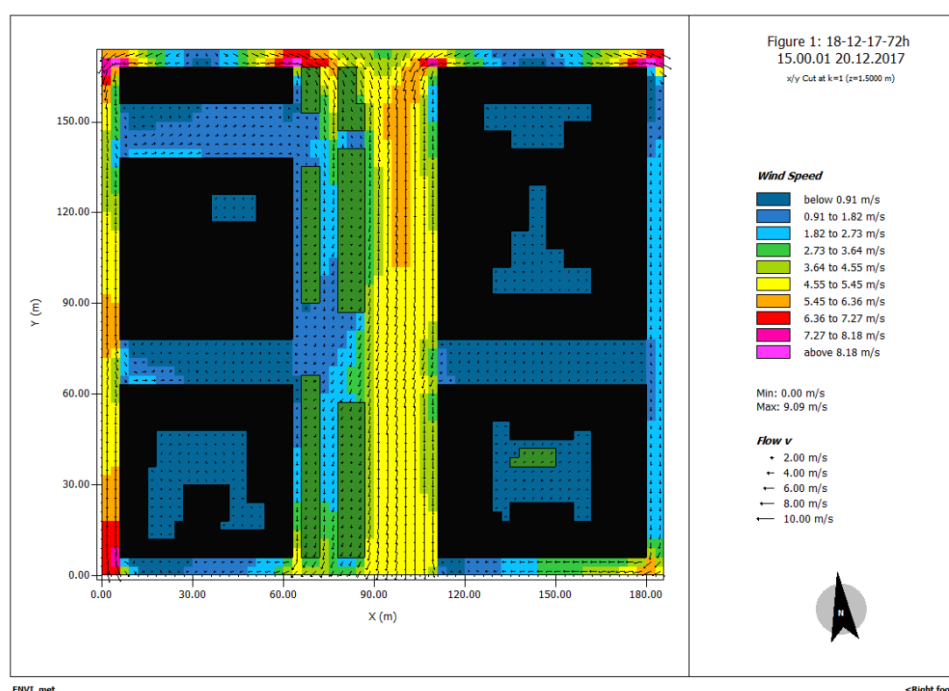


Figura 26 Velocidad del viento (20-12 a 15) con Leonardo (Envi-met)

Si se pasa a analizar la variación del parámetro de la temperatura del aire, mostrado en Fig. 27, se observa que existen diferencias muy ligeras en la banda central libre, completamente afectada por la radiación solar y por lo tanto más caliente que las otras. Se puede observar un ligero resfriado en aquellas zonas que, durante el período de irradiación solar, están cubiertas por la sombra creada por la vegetación. Al analizar la sección entre los dos edificios de la derecha y los dos de la izquierda, se observa un descenso de las temperaturas no indiferente provocado. En cuanto a la diferencia entre la temperatura del lado derecho e izquierdo, ésta es causada por una diferencia

en la ventilación. En el lado derecho, la velocidad del viento es mayor que en el lado izquierdo, así que hay un ligero descenso de la temperatura.

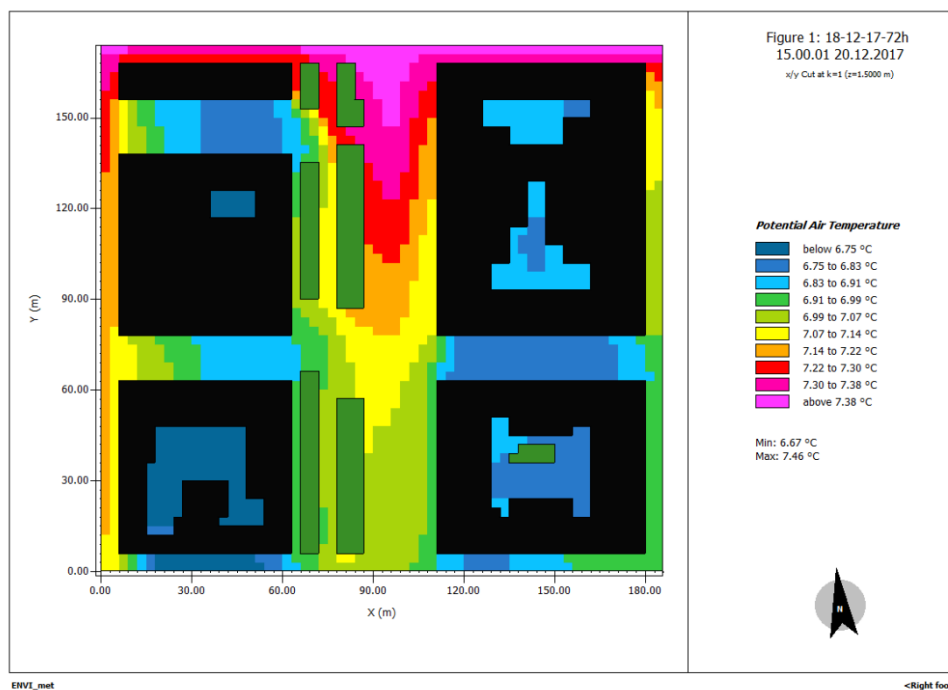


Figura 27 Temperatura dell'aria (20-12 alle ore 15) utilizzando Leonardo (Envi-met)

8.1.3 Análisis del 25/07 a las 06

Otra etapa del trabajo es el análisis del estado no mitigado en el período estival, en particular teniendo en cuenta los efectos de la UHI en el día siguiente al día más caliente del año (24/07) siempre a las 06 horas y a las 15 horas.

En el análisis del primer caso de verano, en horario matutino, se han tenido en cuenta los parámetros de temperatura del aire, intensidad de la radiación solar directa y reflejada (en el período de verano estas dos últimas cantidades tienden a ser más considerables). Esta evaluación ha puesto de manifiesto aspectos muy similares a los analizados anteriormente en el caso del invierno. De hecho, como se observa en la Fig. 28, la velocidad del viento es muy elevada, en relación con el contorno, en la zona central; otra similitud se encuentra en la zona horizontal central en la que la velocidad es prácticamente

nula en la porción que corresponde a los edificios, mientras que aumenta sensiblemente teniendo en cuenta la fila de edificios del lado izquierdo, una vez pasada la zona de ocupación de los mismos. Por supuesto, en el lado derecho se produce un aumento repentino de la velocidad del viento ya que ese lado es totalmente libre, a diferencia del lado izquierdo donde el viento está protegido por la presencia de los árboles.

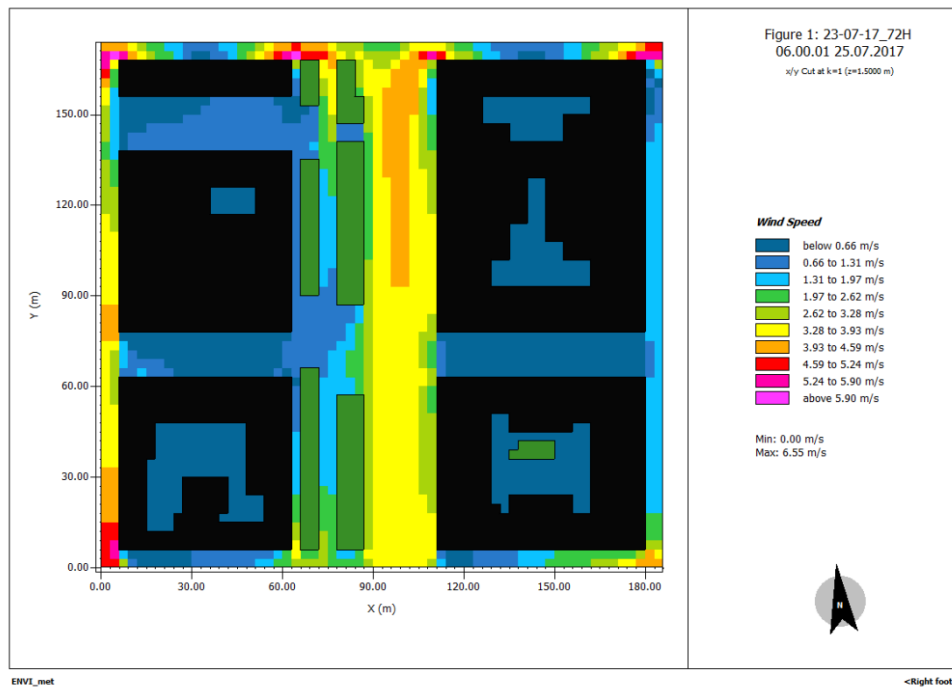


Figura 28 Velocidad del viento (25-07 a las 06) usando Leonardo (Envi-met)

En cuanto a la temperatura del aire, ésta es más alta en las zonas afectadas por una radiación solar directa y más reflejada. Esta respuesta es posible

notarla en la zona central del modelo representado en las Fig 29-30 y 31 que representan los tres parámetros considerados.

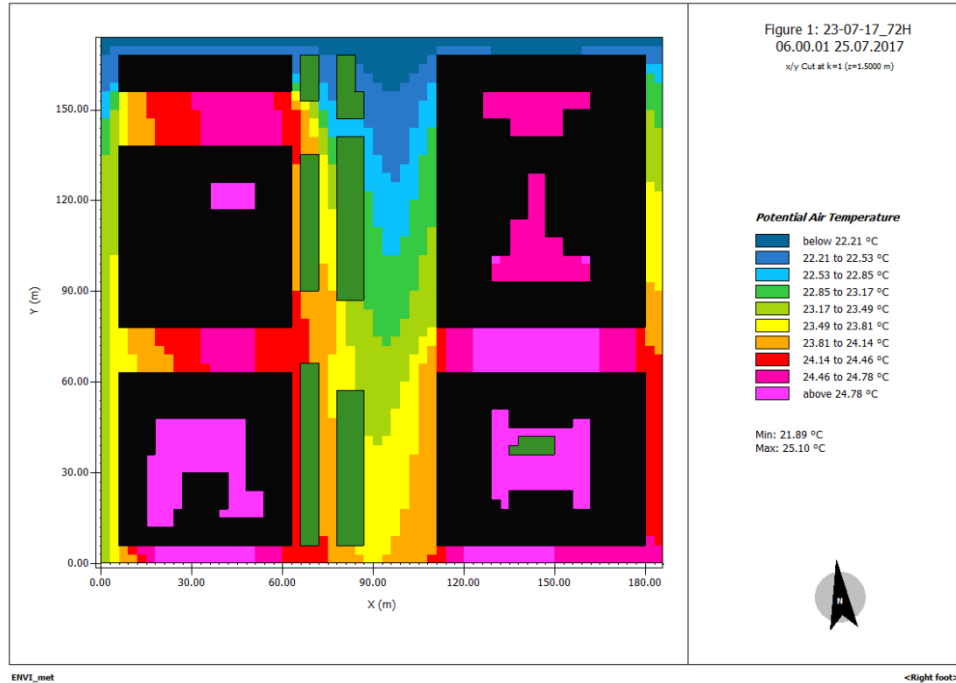


Figura 29 Temperatura del aire (25-07 a 06) usando Leonardo (Envi-met)

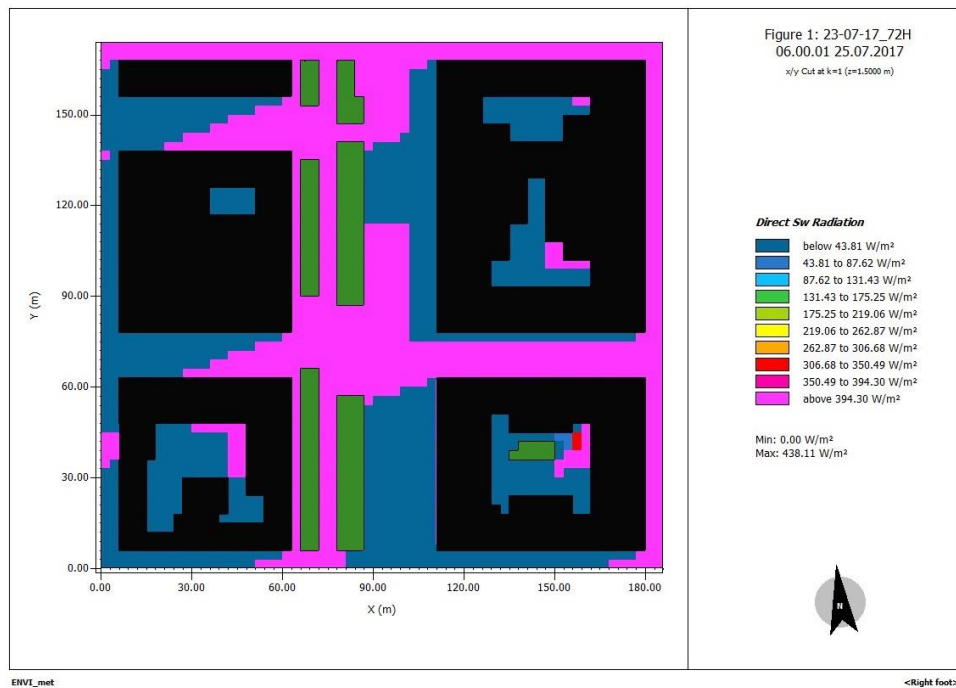


Figura 30 Radiación solar directa (25-07 a las 06) usando Leonardo (Envi-met)

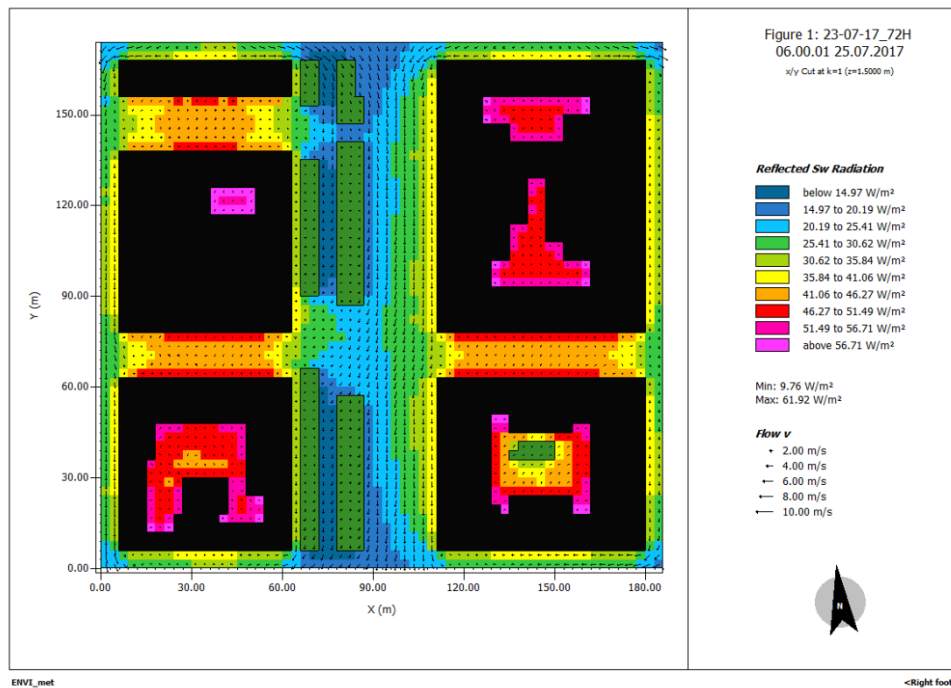


Figura 31 Reflexión solar (25-07 a las 06) usando Leonardo (Envi-met)

8.1.4 Análisis del 25/07 a las 15

El último análisis se refiere al caso del verano durante el horario de la tarde, en particular a las 15.00 horas. Analizando principalmente la temperatura del aire, observamos en la Fig. 32 que la zona central representa el pico de temperatura de unos 35°C (recordando que no se deben evaluar las zonas de los bordes y la envolvente de los edificios); este aumento es más evidente en las zonas donde hay mayor radiación solar (Fig. 33). La temperatura disminuye en las zonas donde se encuentran los árboles, gracias a las zonas de sombra que se crean y al fenómeno de evapotranspiración garantizado por la presencia del suelo.

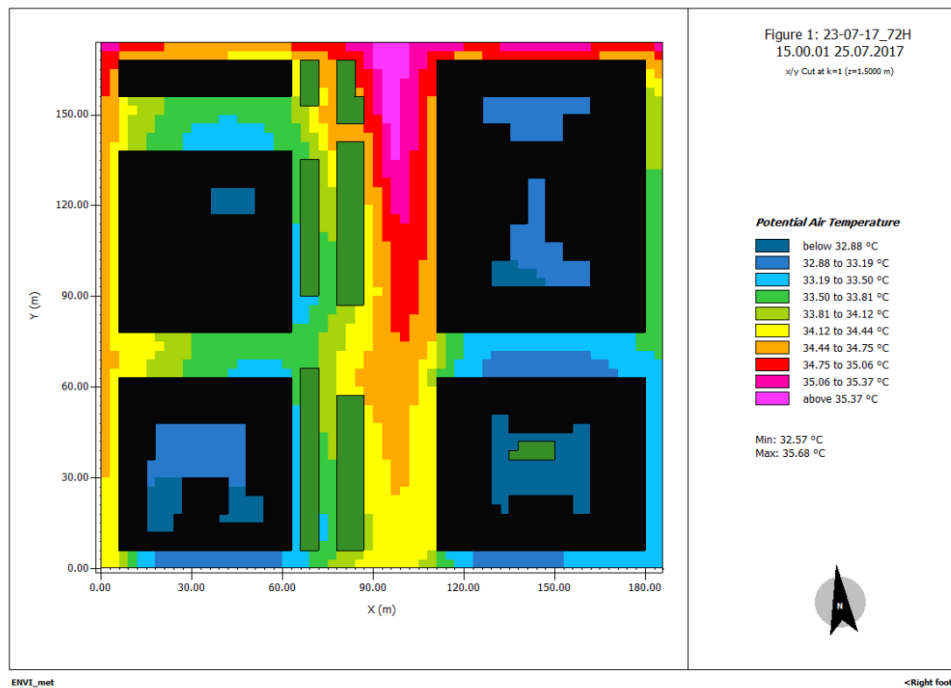


Figura 32 Temperatura del aire (25-07 a 15) usando Leonardo (Envi-met)

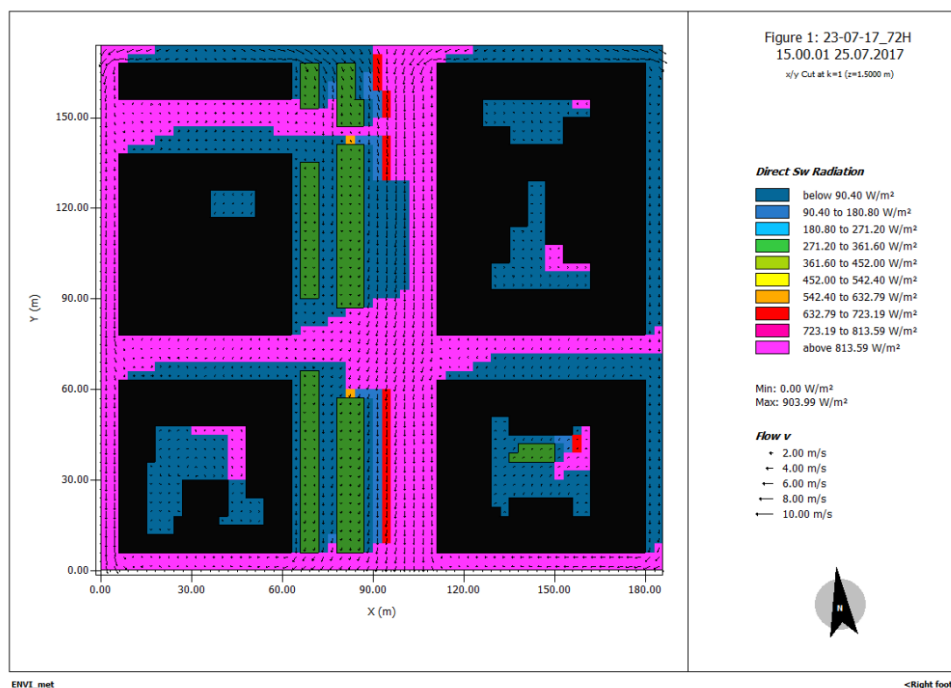


Figura 33 Radiación solar directa (25-07 a las 15) usando Leonardo (Envi-met)

En cuanto a la franja horizontal entre los edificios, el derecho es más cálido que el lado izquierdo. Este comportamiento se explica por el viento que actúa en esa zona. Como se indica en la Fig. 34 y 35, el viento sopla a una velocidad

mucho mayor (de hecho, se pasa de una velocidad de aproximadamente 0,2 m/s en la zona central de la sección entre los dos edificios de la izquierda a aproximadamente 1,2 m/s hacia la parte central del modelo).

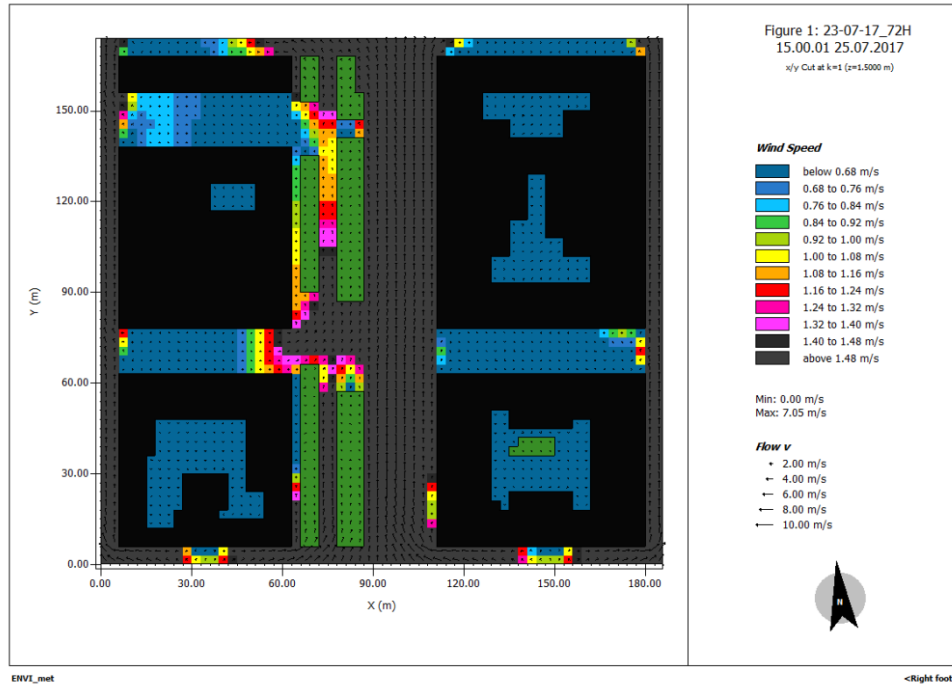


Figura 34 Velocidad del viento (25-07 a las 15) usando Leonardo (Envi-met)

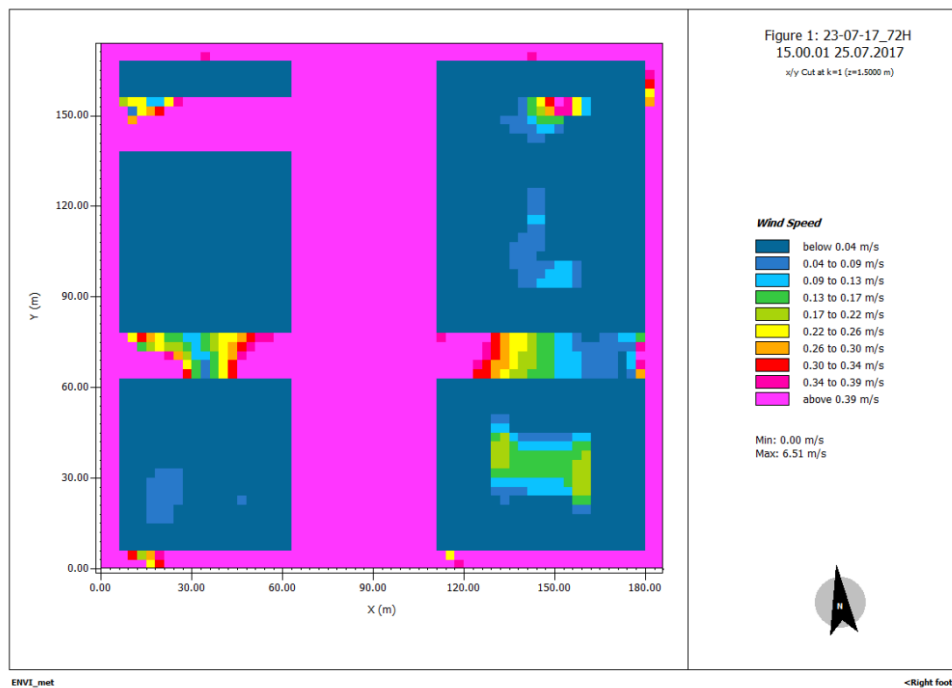


Figura 35 Detalle de la velocidad del viento (25-07 a las 15) usando Leonardo (Envi-met)

8.2 Comparación con materiales termocrómicos

La última sección de análisis realizada durante el presente trabajo se refiere a la comparación entre el comportamiento de los materiales comunes y el de los materiales termocrómicos para evaluar la eficacia de estos últimos en un contexto como el mediterráneo como el del centro de la ciudad de Bari. También en este caso se llevarán a cabo análisis específicos en los mismos días y a los mismos horarios que se establecieron previamente para las evaluaciones de los comportamientos invernales y estivales.

Es necesario hacer dos especificaciones: la primera se refiere al método de comparación utilizado por el software. En la comparación se realiza una diferencia absoluta del parámetro en cuestión, lo que significa una diferencia de valores efectuada, tomando como ejemplo el parámetro de la temperatura, en el orden $T_{\text{caso base}} - T_{\text{termocrómicos}}$. Esta precisión es necesaria para explicar los valores negativos y positivos devueltos por el software.

La segunda precisión se refiere a la aproximación hecha para poder simular el comportamiento de los materiales termocrómicos. De hecho, se hizo obligatorio realizar en Envi-met dos tipologías de materiales que representaran la variación cromática y de albedo de los termocrómicos. Esto ha llevado a una situación que no refleja fielmente la realidad, es decir, que los materiales termocrómicos se caractericen por valores de reflectancia más elevados incluso para temperaturas inferiores a la temperatura de transición principalmente en verano, cuando en las primeras horas del día se alcancen temperaturas inferiores a la temperatura crítica.

8.2.1 Comparación de resultados de 20-12 a las 06

Al comenzar el análisis de comparación de los datos, se inició con el invierno a las 06 horas. En este caso se comparan los materiales termocrómicos de color oscuro, que por lo tanto tendrán mayor capacidad de absorción y menor albedo, con los materiales comunes. La Fig. 36 muestra que la temperatura del aire suele ser ligeramente más alta en el caso termocrómico que en el caso básico. Este comportamiento se justifica precisamente por la capacidad de absorber una mayor cantidad de calor que luego se devuelve de manera desfasada durante las horas nocturnas, también gracias a la capacidad de inercia térmica de las estratigrafías de la muralla. Sin embargo, debe tenerse en cuenta que no hay radiación solar durante la noche y durante varias horas antes de la medianoche, por lo que días muy cortos, hay poca posibilidad de absorción de la radiación solar, junto con la mayor relación entre días nublados y soleados que ralentizan aún más la entrada de radiación solar en los contextos urbanos.

En cuanto a la radiación solar reflejada, ésta es mínima, véase Fig. 37, ya que el análisis se realiza a primera hora de la mañana, cuando el sol sigue estando muy bajo en el horizonte.

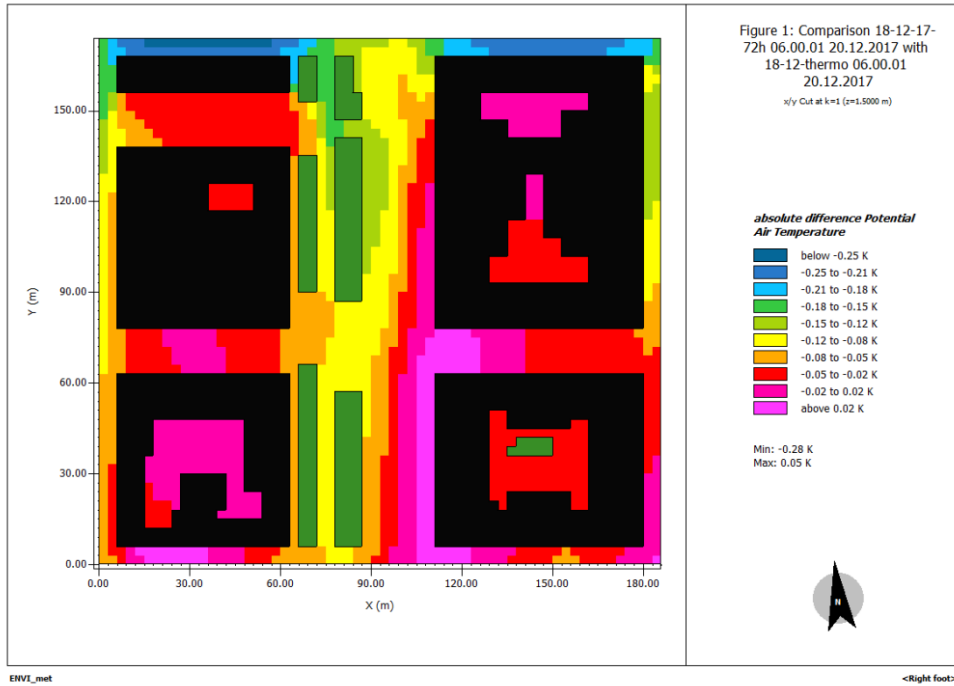


Figura 36 Comparación entre las temperaturas del aire (20-12 a 06) usando Leonardo (Envi-met)

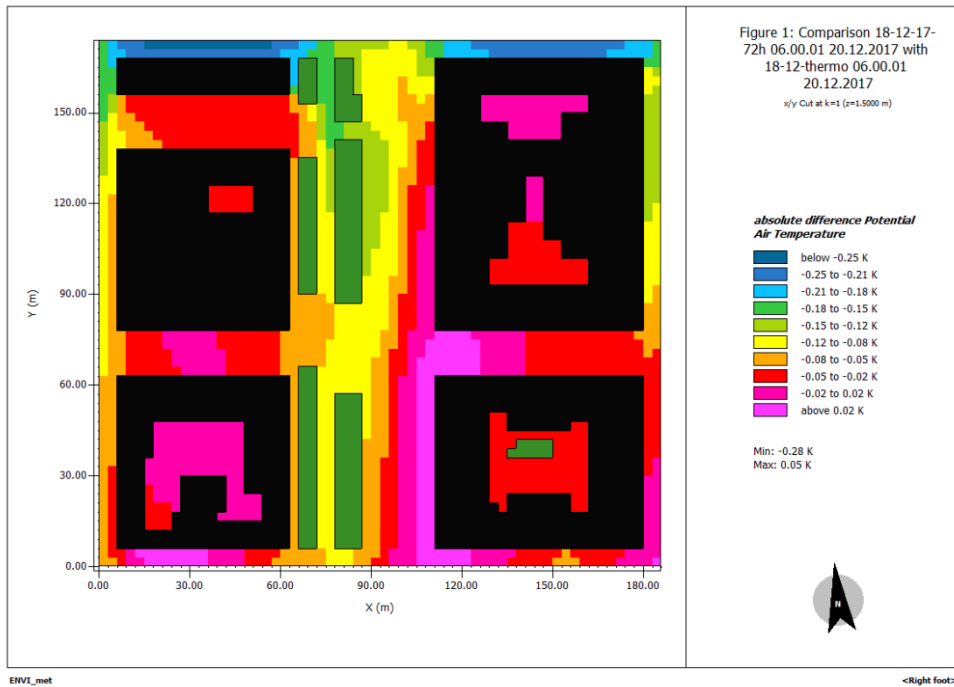


Figura 37 Comparación de la radiación reflejada (20-12 a las 06) usando Leonardo (Envi-met)

En el análisis realizado exclusivamente en los revestimientos de los edificios, se analizaron los parámetros de temperatura superficial, radiación solar directa absorbida y radiación solar reflejada. Por supuesto, estos tres parámetros están estrechamente relacionados con el tiempo y por lo tanto con la altura e intensidad del Sol. De la Fig. 38 se desprende que la temperatura superficial es ligeramente mayor en el caso de los materiales termocrómicos, ya que tienden a aumentar su capacidad de absorción. En particular, es evidente el cambio de color que se tiene en el edificio más alto del modelo. Esta parte de la fachada presenta una diferencia de temperatura de entre 0,2 y 0,5 en favor de los termocrómicos, que tienen una superficie más cálida.

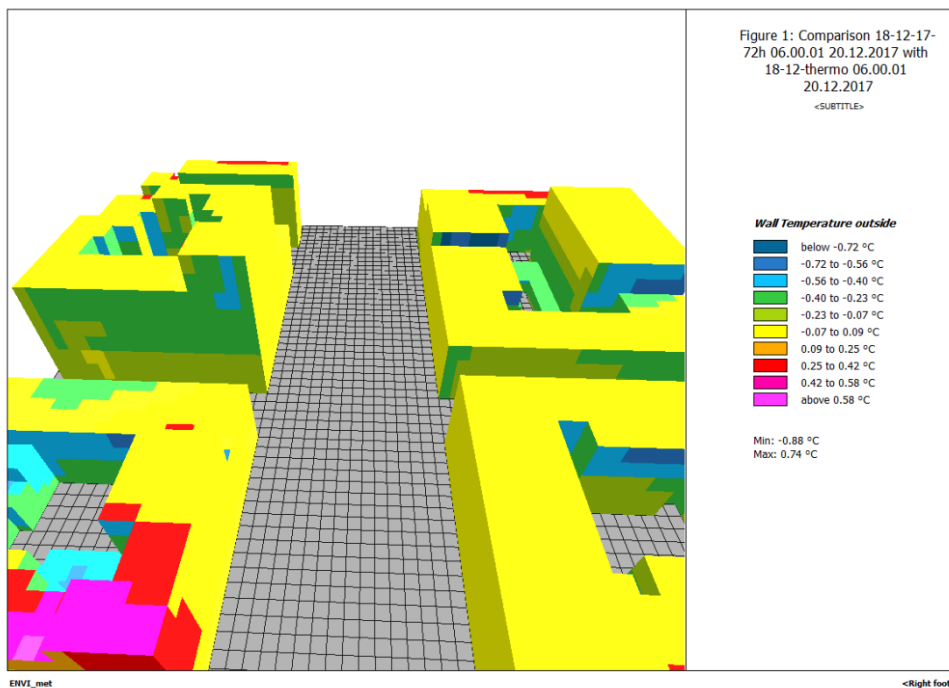


Figura 38 Comparación de la temperatura superficial de las fachadas (20-12 a 06) con Leonardo (Envi-met)

Este comportamiento se puede explicar por notar que es el edificio que permanece más tiempo expuesto a la radiación solar durante el día anterior, y por lo tanto tiene una mayor cantidad de calor a liberar durante la noche, permaneciendo más caliente en estas horas no iluminadas naturalmente. Por supuesto, los valores de radiación solar absorbida (Fig. 39) y reflejada (Fig. 40) son infinitesimales tanto porque se trata de horas nocturnas, por lo que la

radiación solar ha estado ausente durante unas 10 horas debido a la temporada de invierno, bien porque la intensidad de la radiación es mucho menor en enero.

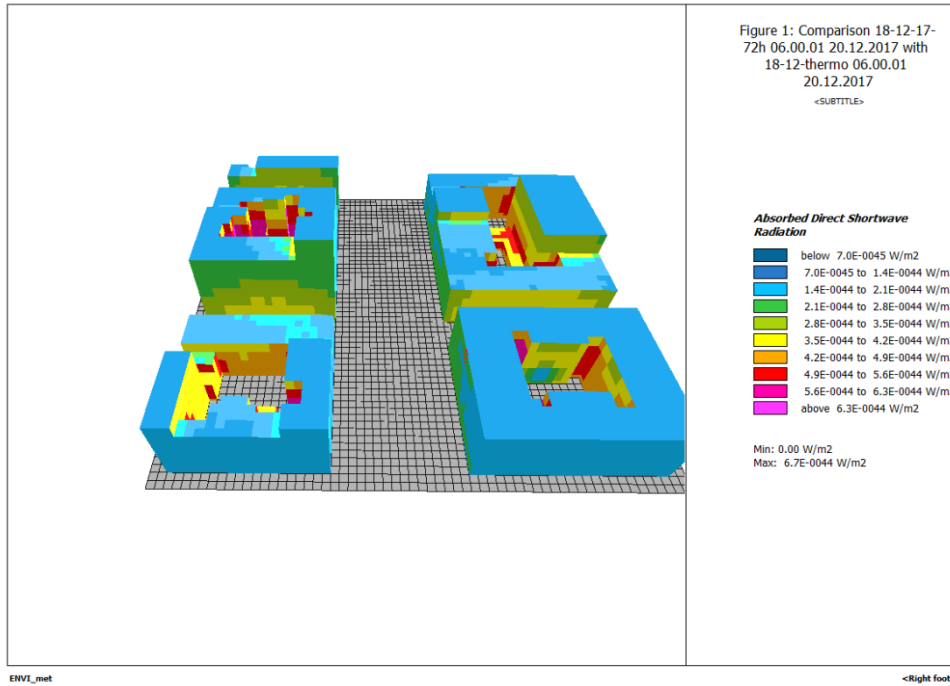


Figura 39 Comparación de la radiación directa absorbida por las fachadas (20-12 a las 06) usando Leonardo (Envi-met)

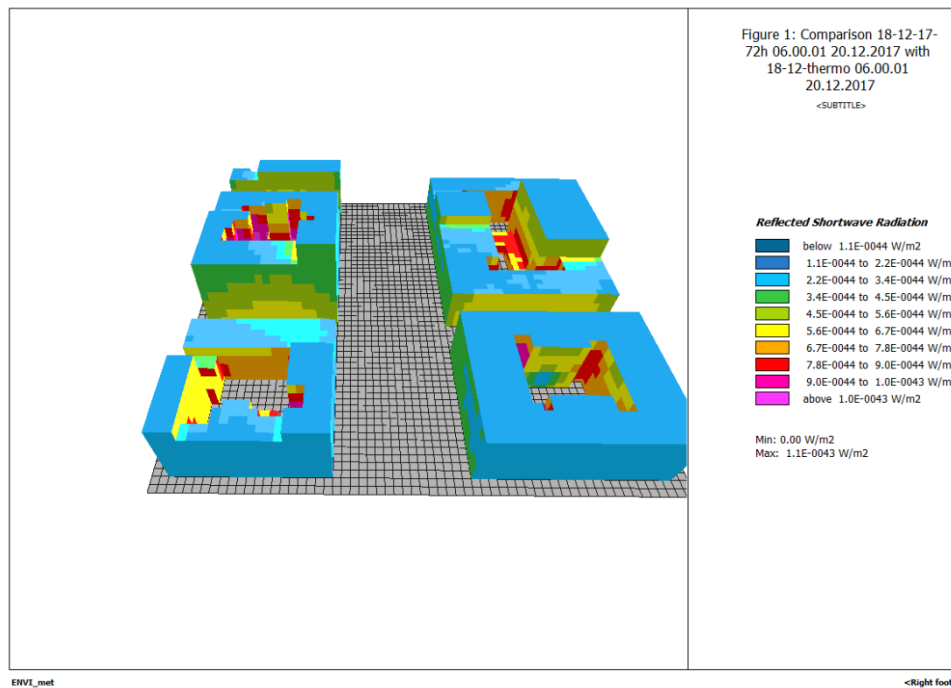


Figura 40 Comparación de la radiación reflejada de las fachadas (20-12 a las 06) usando Leonardo (Envi-met)

8.2.2 Comparación de resultados de 20-12 a las 15

Yendo a analizar la situación de la tarde del invierno, la Fig. 41 muestra una temperatura casi uniforme, casi sin diferencias en la zona central (los bordes, como se ha mencionado anteriormente, no deben tenerse en cuenta, ya que se ven afectados por factores externos que no podemos considerar). Se observa una diferencia de temperatura un poco más marcada en el lado derecho del modelo. Esta diferencia se explica por tres factores relacionados entre sí: radiación solar directa, estratigrafía de mampostería y material que compone la fachada. El lado considerado es irradiado por una mayor radiación solar (Fig.42); esto permite, gracias a los materiales termocrómicos y al tipo de

albañilería presente, almacenar y reintroducir en ambiente más calor, aumentando la temperatura del aire.

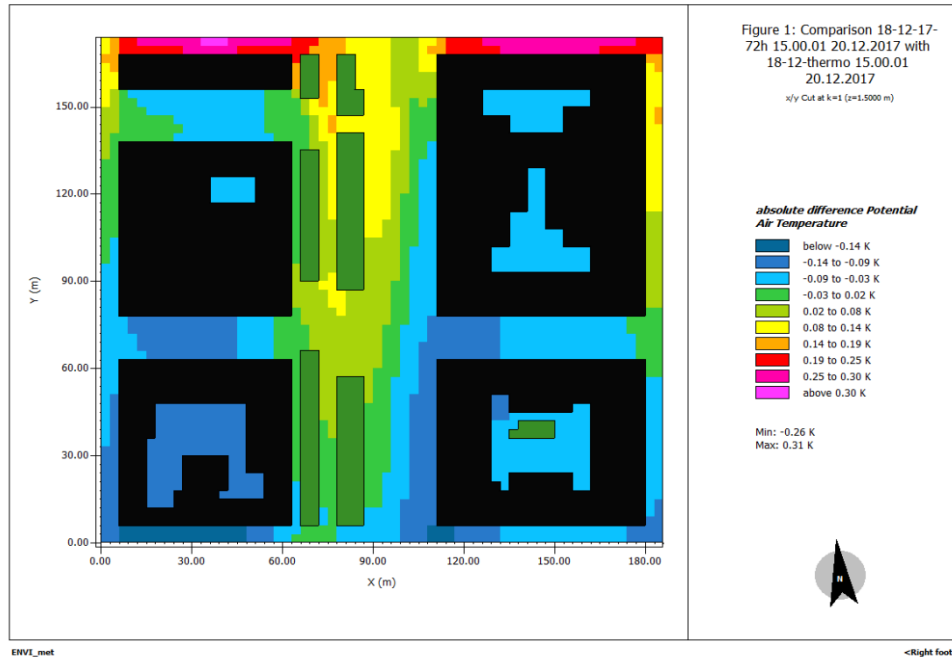


Figura 41 Comparación entre las temperaturas del aire (20-12 a 15) usando Leonardo (Envi-met)

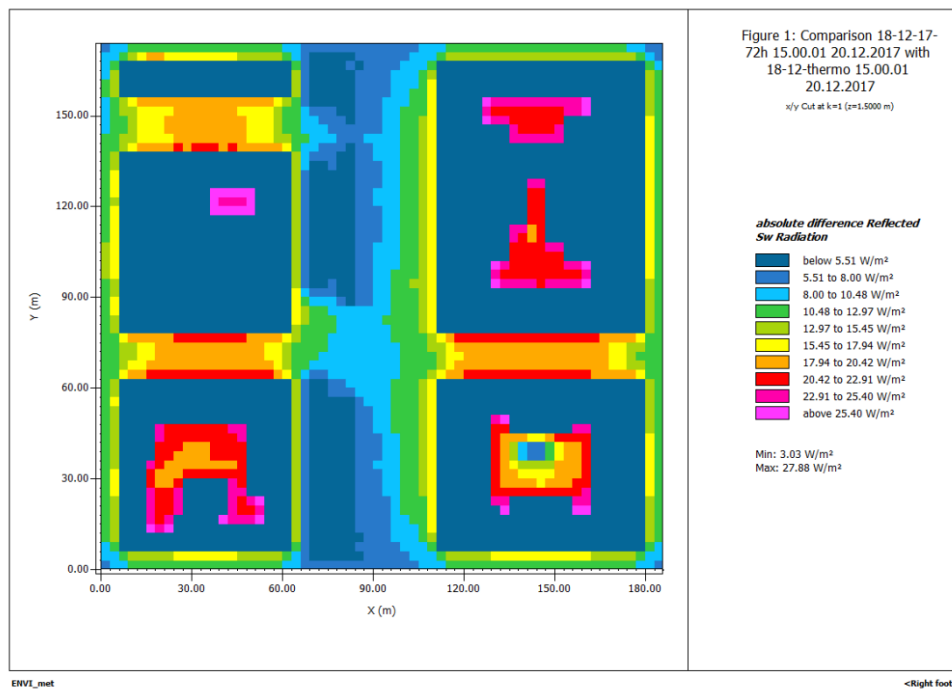


Figura 42 Comparación de radiación reflejada (20-12 a 15) usando Leonardo (Envi-met)

El análisis de la situación en las fachadas ha vuelto a una situación clara. Comenzando con el examen de la radiación solar, ésta resulta ser directa y más intensa en las fachadas expuestas al sur y al oeste ya que es mayor la cantidad de radiación absorbida, Fig. 43, por las estratigrafías que contienen materiales termocrómicos.

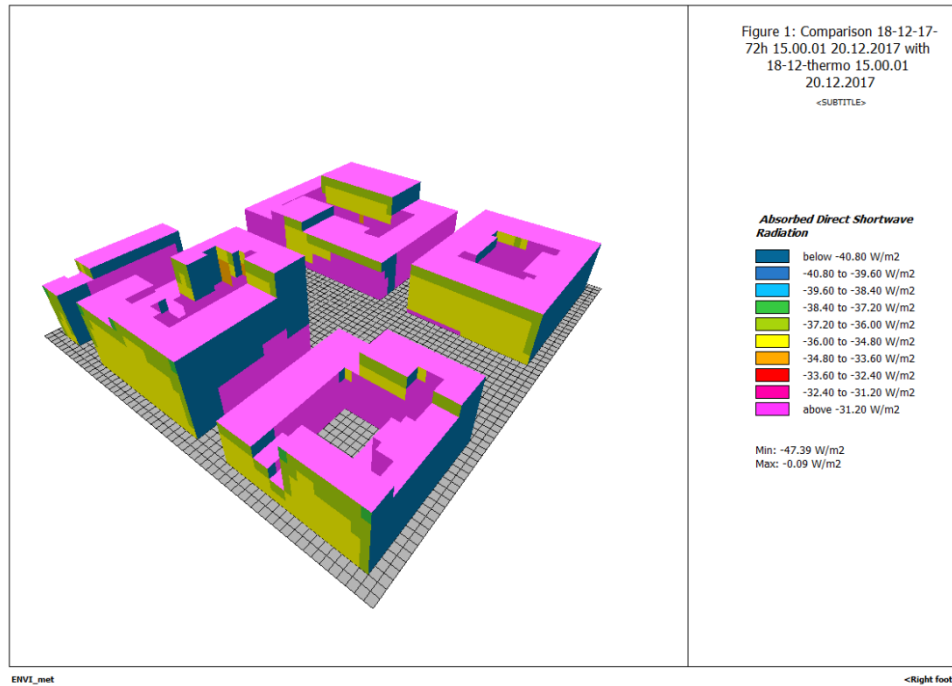


Figura 43 Comparación de la radiación directa absorbida por las fachadas (20-12 a 15) usando Leonardo (Envi-met)

Del mismo modo, en los mismos lugares, la radiación solar se refleja más en el caso de los materiales comunes, Fig. 44.

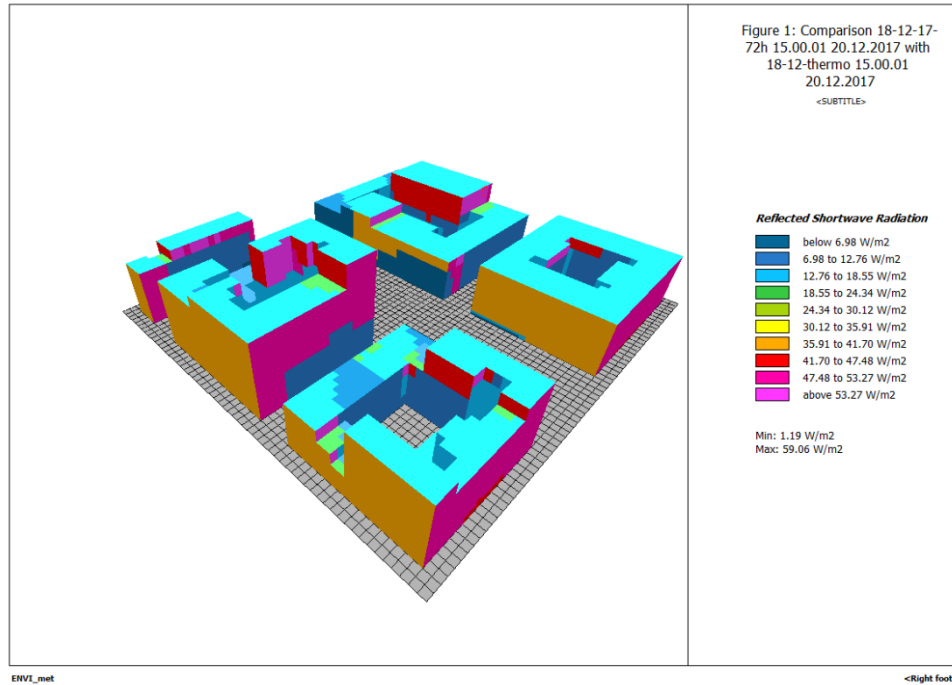


Figura 44 Comparación de la radiación reflejada de las fachadas (20-12 a 15) usando Leonardo (Envi-met)

Desde el punto de vista de las temperaturas, Fig. 45, que están estrechamente relacionados con estos parámetros, son generalmente mayores en el caso de los termocrómicos, en particular, las zonas con menor cantidad de radiación solar presentan una elevación de la temperatura comprendida entre 0,7° y 1,4°C, es decir, una media de 1° C; la diferencia aumenta cuando se observa la temperatura de las fachadas expuestas directamente a la radiación, es decir, la del edificio más alto, por ejemplo, que da lugar a un aumento de la temperatura de la superficie de entre 4 °C y 5 °C.

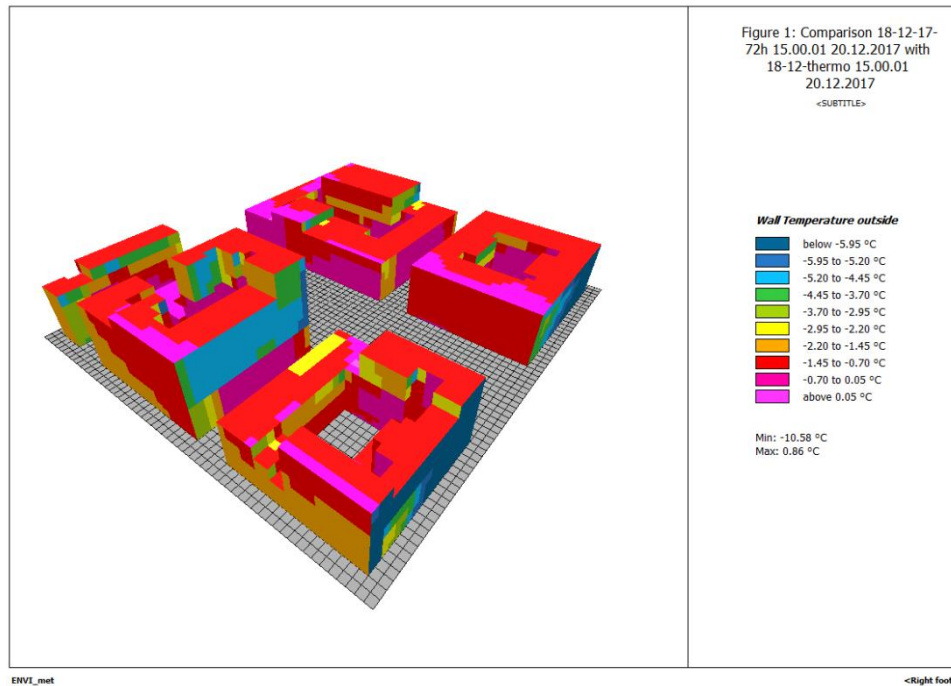


Figura 45 Comparación de la temperatura superficial de las fachadas (20-12 a 15) con Leonardo (Envi-met)

8.2.3 Comparación de resultados de 25-07 a las 06

El análisis de la comparación de los resultados en la temporada de verano incluye el último párrafo del presente estudio. Desde el estudio de la Fig. 46 se observa que hay diferencias entre la temperatura estival a las 06.00 horas utilizando un material común con respecto al uso del material termocrómico, que garantiza una menor absorción del calor. Es preciso señalar que, al examinar este período, no se disfruta de una irradiación elevada, por qué las diferencias de temperatura del aire están entre 0.02°C y 0.07°C. Otro factor

muy importante es la diferencia de albedo que hay entre los materiales considerados, alrededor de 0,11.

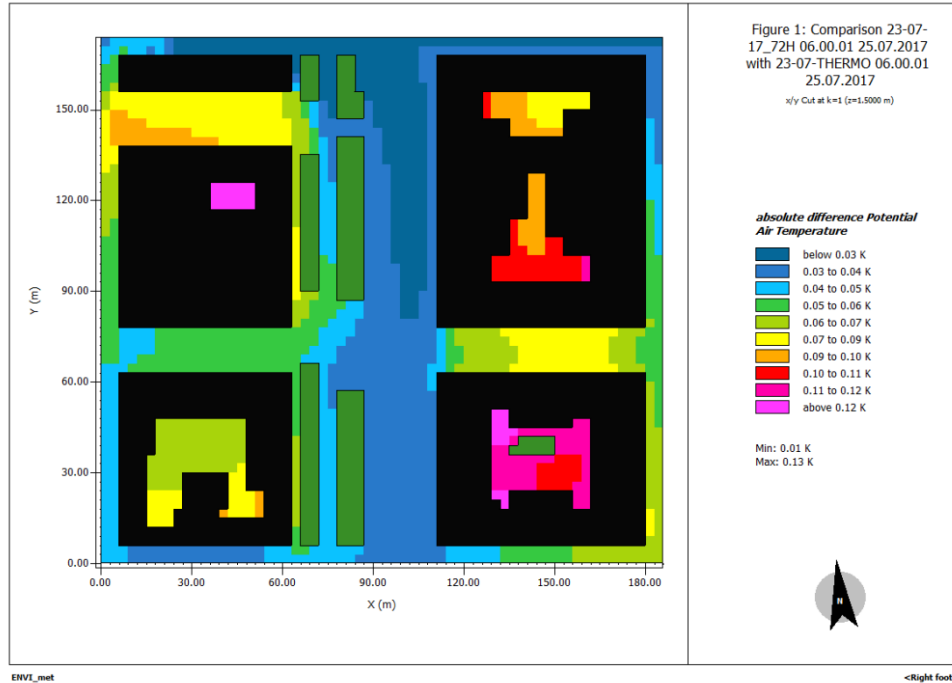


Figura 46 Comparación entre las temperaturas del aire (25-07 a las 06) usando Leonardo (Envi-met))

Como no hay variaciones en la ventilación y la radiación, estos dos parámetros no afectan al resultado final, a diferencia de la radiación solar reflejada, que garantiza variaciones, como se nota en la figura. 47. Estas diferencias permiten reducir la cantidad de calor absorbido y luego liberado,

creando zonas más frescas, yendo a mitigar lo que es un llamado cañón urbano.

La vegetación también garantiza una pequeña ganancia en términos de refrigeración gracias a su capacidad de absorción, necesaria para la activación del fenómeno de evapotranspiración.

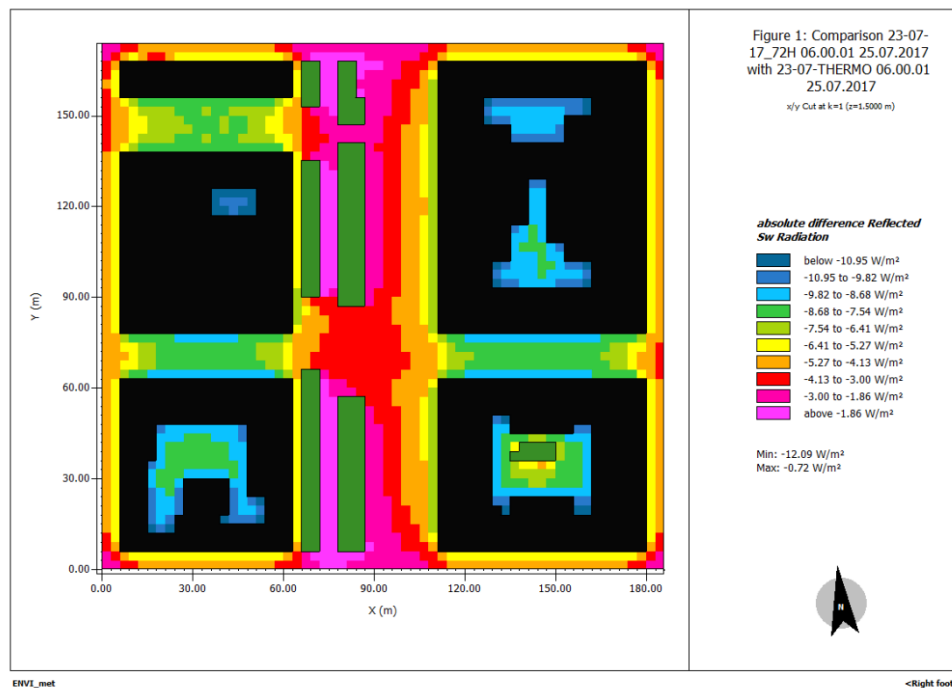


Figura 47 Comparación de la radiación reflejada (25-07 at 06) usando Leonardo (Envi-met)

En cuanto a los factores accidentales en las fachadas, es decir, la radiación solar absorbida, mostrada, y el reflejo. Siendo los materiales termocrómicos capaces de reflejar más, para la comparación del período estival, la Fig. 48 nos muestra que, en la hora seleccionada, la radiación solar sólo afecta a las fachadas del lado este con una cierta intensidad, disminuyendo en las fachadas perpendiculares a las directamente afectadas. Nota especial es que la absorción cae drásticamente en la parte inferior de los edificios del lado izquierdo. La explicación de este comportamiento es la presencia de la vegetación: los árboles crean zonas de sombra ya desde las primeras horas de la mañana, permitiendo una menor acumulación de calor en fachada. Lo mismo se puede hacer para la reflectancia, Fig. 49, en la parte inferior de los

edificios del lado izquierdo, siempre cubiertos por la vegetación, mientras que en las restantes zonas donde la absorción aumentaba para los materiales comunes, en el caso de la reflectancia ocurre exactamente lo contrario, que este parámetro aumenta en el caso de los materiales termocrómicos, como era de esperar.

El comportamiento de los nuevos materiales también afecta, por supuesto, a la temperatura superficial de los revestimientos, Fig. 50. Este parámetro presenta una disminución gracias a la aplicación de los termocrómicos de una media de 1 °C, con zonas donde se alcanza un aumento de 1,5 °C. En las porciones no soleadas o sombreadas por los árboles, la diferencia de temperatura desciende hasta llegar a 0,25 °C.

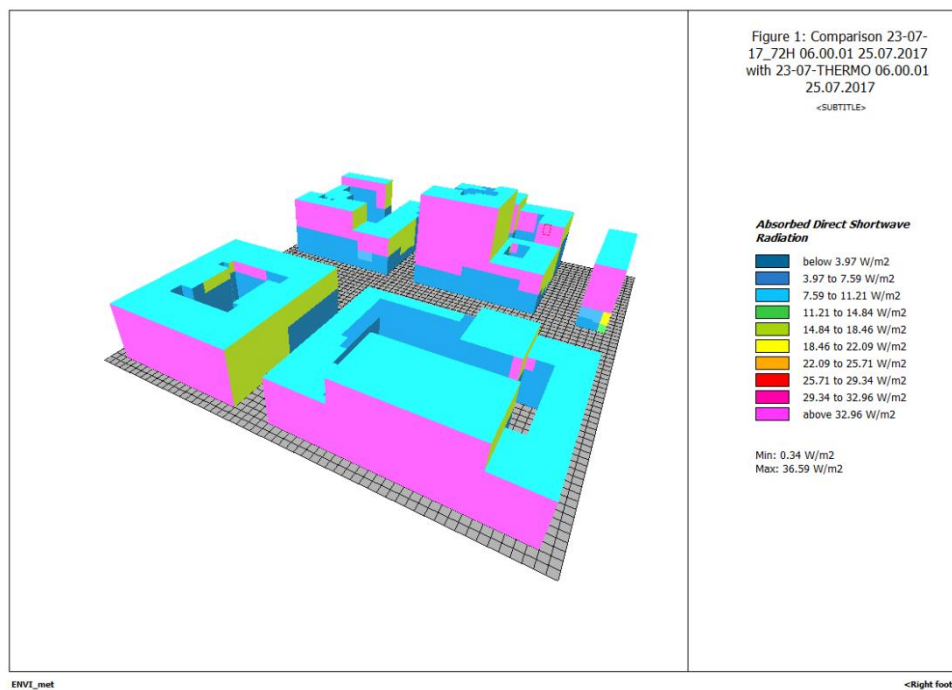


Figura 48 Comparación de la radiación directa absorbida por las fachadas (23-07 a las 06) usando Leonardo (Envi-met)

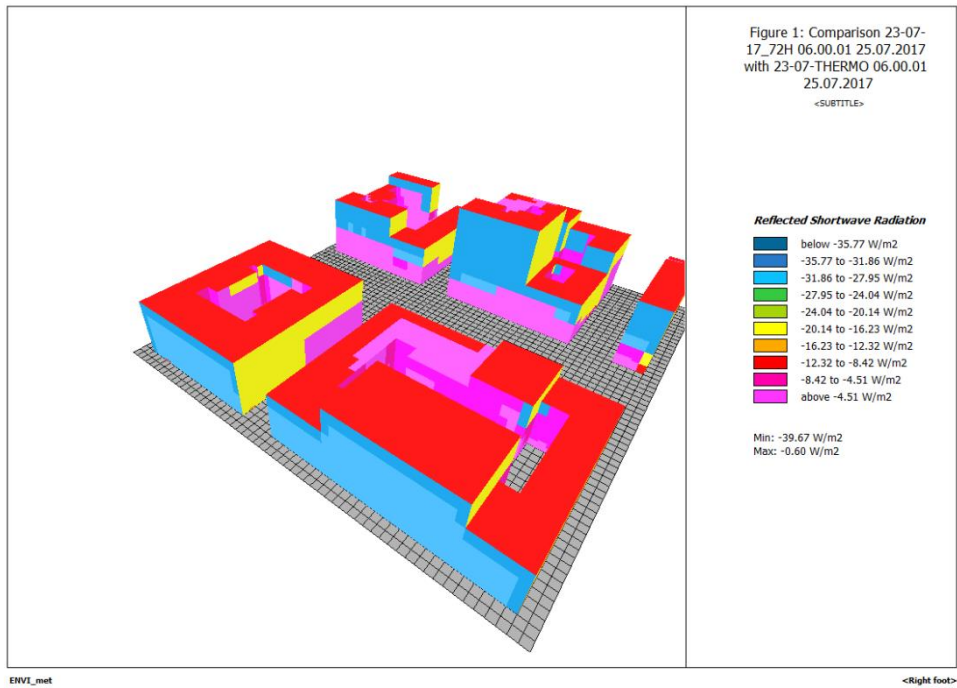


Figura 49 Comparación de la radiación reflejada en las fachadas (23-07 a las 06) usando Leonardo (Envi-met)

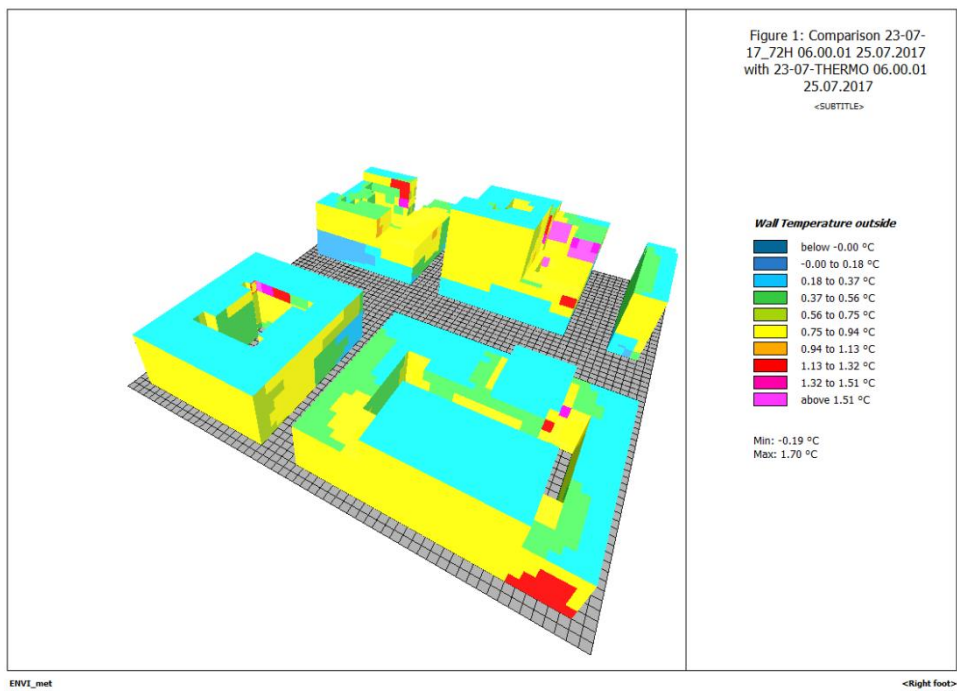


Figura 50 Comparación de la temperatura superficial de las fachadas (23-07 a las 06) con Leonardo (Envi-met)

8.2.4 Comparación de resultados de 25-07 a las 15

En el último análisis se han tenido en cuenta las situaciones de tarde de verano (a las 15 horas) de las simulaciones realizadas con materiales comunes y, a continuación, con materiales termocrómicos.

El resultado mostrado en la Fig. 51 muestra una situación similar a la anterior, con descensos de temperatura en las mismas zonas, en particular en los cañones urbanos presentes ya que la mayor reflexión, y menor absorción, favorecen la salida de la radiación solar (Fig. 52). Lo mismo se puede decir de la situación que se viene creando en los patios de los edificios que resultan ser las zonas que más se aprovechan del aumento de arbolado. También se consigue una mejora de la temperatura en las áreas bajo las zonas arboladas, gracias a las cuales se obtienen porciones de sombra que enfrían el aire y absorción de calor en forma de energía térmica, útil para el proceso de evapotranspiración.

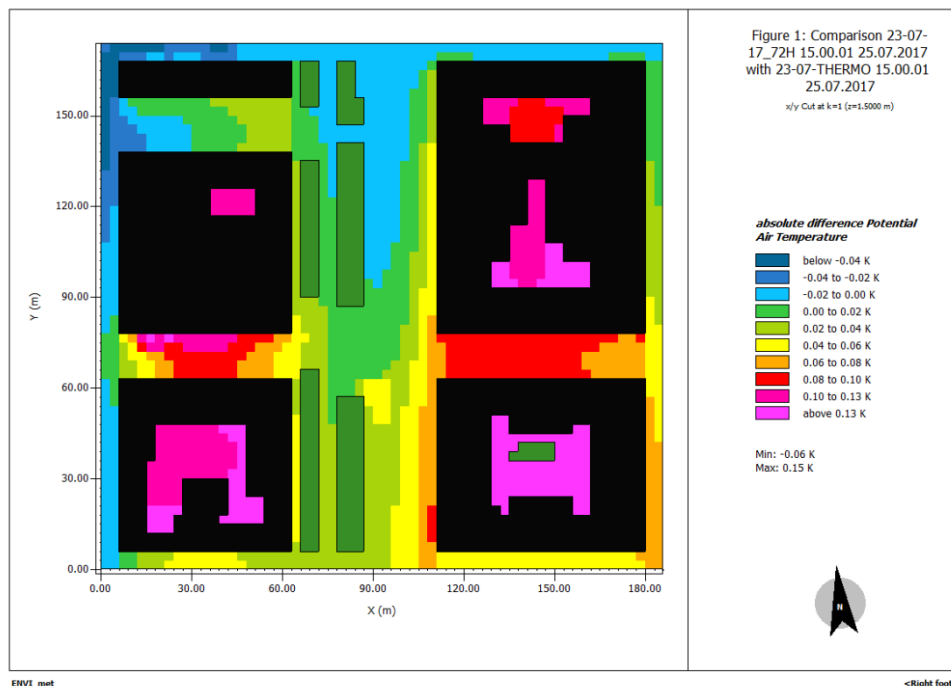


Figura 51 Comparación de la temperatura del aire (25-07 a las 15) usando Leonardo (Envi-met)

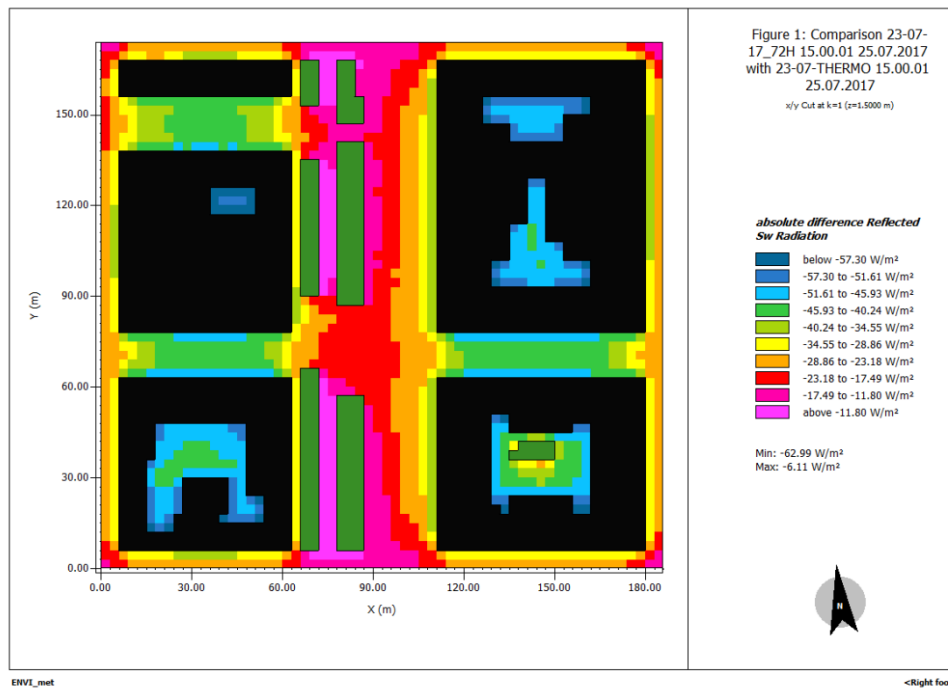


Figura 52 Comparación de la radiación solar reflejada (25-07 a las 15) usando Leonardo (Envi-met)

Analizando los parámetros de las fachadas, se nota que las intensidades de la radiación solar absorbida y reflejada, Fig. 53 y 54, tienen valores muy diferentes, obviamente mayores en favor de la reflectancia, como se esperaba. En esta franja horaria la radiación solar golpea sobre todo los techos, disminuyendo drásticamente, cerca de siete veces, en fachada, donde precisamente la absorción es muy baja. Desde el punto de vista de la intensidad de la radiación reflejada, esta alcanza picos de más de 100 W/m² en los techos, disminuyendo unas diez veces en la fachada, ya que la radiación solar es prácticamente perpendicular a las superficies horizontales de cobertura. Desde el punto de vista de la temperatura, Fig. 55, la ganancia media (por lo tanto, la disminución de la temperatura superficial de los revestimientos) obtenida gracias al uso de materiales termocrómicos es de aproximadamente 4 °C, mientras que el pico se alcanza sólo en determinadas zonas, alcanzando los 7, 3°C.

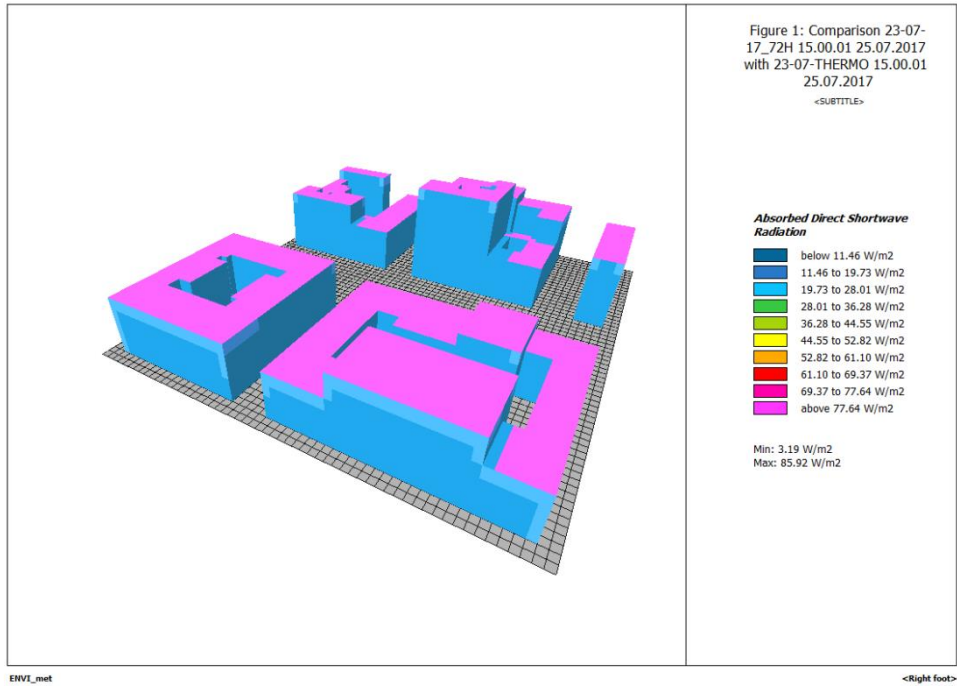


Figura 53 Comparación de la radiación directa absorbida por las fachadas (23-07 a las 15) usando Leonardo (Envi-met)

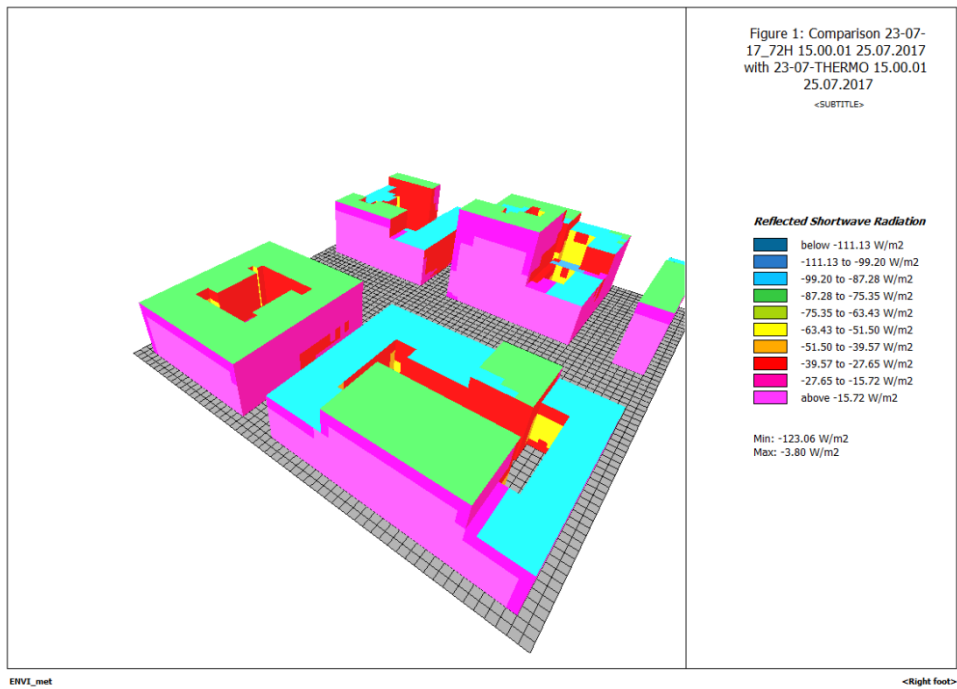


Figura 54 Comparación de la radiación reflejada de las fachadas (23-07 a las 15) usando Leonardo (Envi-met)

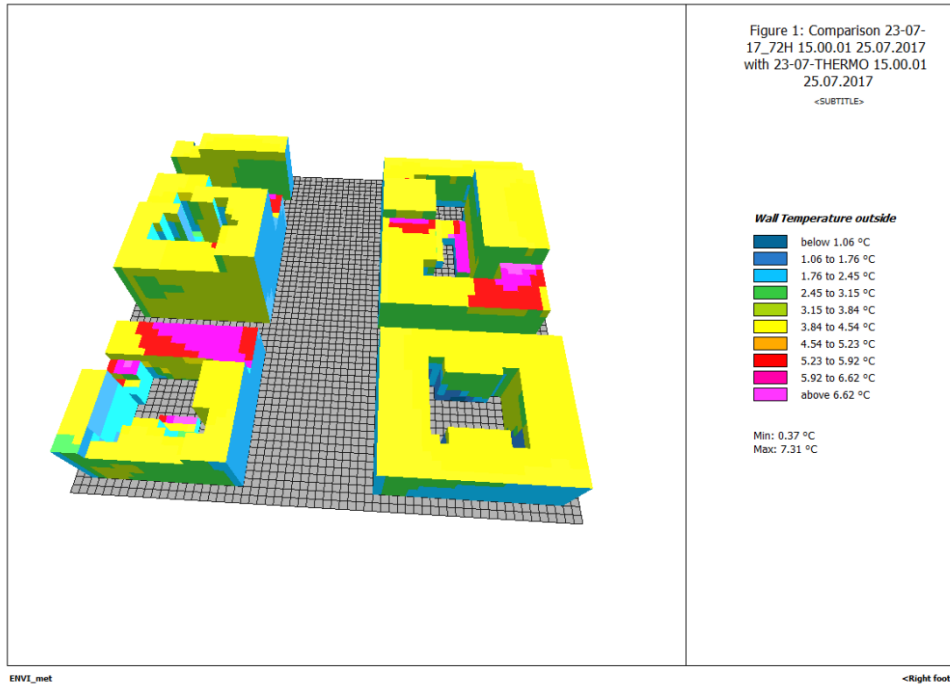


Figura 55 Comparación de la temperatura superficial de la fachada (23-07 a las 15) con Leonardo (Envi-met)

9. Conclusiones

Como ya se ha explicado, los edificios son responsables de un consumo muy elevado de energía no renovables en su ciclo de vida. Esto tiene distintas razones y también varias consecuencias. Entre estas hay seguramente el desarrollo de la isla de calor urbano. Este fenómeno es un punto de partida fundamental para seguir con este estudio. En particular ha sido útil aprender cuales son los parámetros que intervienen en la isla de calor urbano y que están directa o indirectamente relacionados a los edificios y a los materiales que los componen. El estudio que se ha llevado a cabo ha definido como causas principales del UHI la interacción entre urbanización (morfología y densidad de edificios) y radiación solar que afecta la ciudad, y también se ha comprendido de que manera influyen los materiales de los edificios.

Para intentar cumplir acciones necesarias a la eliminación, o mejor, disminución de la UHI, se han buscado materiales que, con sus características, podían ayudar en este escopo. Entre estos hay materiales cromogénicos innovadores que tienen la propiedad de cambiar algunas de sus características al variar factores térmicos externos como la temperatura, la intensidad de la radiación solar, etc. Este estudio se centró en un grupo de la familia de los cromógenos, los termocrómicos, capaces de modificar su color, y en consecuencia los parámetros de reflectancia y absorción, al variar la temperatura y de la radiación solar incidente. Después de haber estudiado como influyen en el entorno estos materiales, se ha elegido, entre los materiales realizados por otros estudios, cuales pueden ser los mejores en nuestro caso. Por esto, se ha decidido utilizar para los análisis el material que tiene mas diferencia entre la reflectancia en el caso colorado (menor radiación solar incidente) y el caso no colorado, blanco (mayor radiación solar).

En seguida, se ha evaluado el tipo de consecuencias de la aplicación de estos materiales a los edificios situados en una parte del centro de la ciudad de Bari. A partir del análisis del caso base, se han puesto de manifiesto las

criticalidades derivadas del uso de materiales clásicos. A continuación, se llevó a cabo un análisis comparativo de los resultados obtenidos con los materiales comunes y los obtenidos con la aplicación de los termocrómicos. Estas comparaciones pusieron de manifiesto lo que cabía esperar en el caso invernal, es decir, un mínimo aumento de la temperatura, del orden de $0,2\text{ }^{\circ}\text{C}$, ya que el aumento del número de albedo sólo afectó a los edificios, sin tener en cuenta el asfalto y las aceras, que, con su color oscuro y su material absorbente, juegan un papel fundamental en el aumento de la temperatura del aire. Por lo que se refiere al caso estival, se observa que la temperatura del aire aumenta, como se esperaba, sobre todo en las zonas más afectadas por el uso de los termocrómicos, como los cañones urbanos. También fue importante el papel de la vegetación, como se explica durante los análisis, que permiten absorber calor y crear zonas de sombra en verano, mientras que garantizan protección contra el viento en invierno. También en el caso del verano, el delta de temperatura del aire entre el caso base y el termocrómico es de aproximadamente $0,15\text{ }^{\circ}\text{C}$. Esta diferencia confirma lo que había sido estudiado previamente por Synnefa et al (2007a) que realizó ensayos en Atenas, demostrando que el aumento de $0,65$ grados en el albedo de los edificios permite una disminución de la temperatura del aire de $2,2\text{ }^{\circ}\text{C}$. Considerando que el aumento de albedo de este estudio es de $0,11$, la aproximación realizada en el momento de la simulación del material termocrómico, y que el análisis se realizó en la ciudad de Bari, diferente de Atenas por localización, puede decirse que los resultados son coherentes con los anteriores.

En cuanto a la temperatura superficial de la fachada, el delta de temperatura garantizado principalmente por los materiales termocrómicos en el caso invernal es de aproximadamente $2\text{ }^{\circ}\text{C}$, con zonas donde este aumento de las temperaturas es más llamativo (se llega a cerca de $6\text{ }^{\circ}\text{C}$) debido a la mayor radiación solar incidente durante el día. En el caso del verano, el aumento medio de la temperatura superficial es de $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ con picos de $7\text{ }^{\circ}\text{C}$. Estos resultados son similares a los alcanzados por Karlessi et al (2009). Este mismo autor, muestra para este material un delta de temperatura superficial

de las fachadas igual a 11 °C, si se aplica en Atenas en los meses de agosto y septiembre. Los factores que pueden haber influido en esta diferencia son de distinta naturaleza: en primer lugar, es necesario recordar la aproximación hecha en la salida, en la que se utilizaba un solo material, sin variación de albedo, para el día de verano, perdiendo la característica de la variación cromática a la variación de la temperatura; además, el estudio efectuado del artículo de referencia se realizó en Atenas, ciudad con clima mucho más cálido que Bari por varias razones. Primero por la latitud, muy similar a la del Norte-Africana se caracteriza por situaciones meteorológicas distintas (temperatura del aire, velocidad y dirección del viento, intensidad de la radiación solar incidente). Todos estos factores pueden afectar a los análisis realizados, yendo a crear la diferencia que existe entre los resultados.

En conclusión, se puede afirmar que los materiales termocrómicos confirman también en este caso lo que se había estudiado anteriormente, es decir, que pueden ser un excelente instrumento para favorecer la mitigación de la UHI, en particular yendo a disminuir las temperaturas superficiales y atmosféricas en verano, y capturando energía térmica en la estación invernal, con todas las implicaciones ulteriores que estos comportamientos pueden tener en la disminución de la demanda energética por parte de los edificios, los cuales tendrían una temperatura interna seguramente más cómoda, permitiendo un menor recurso a las climatizaciones mecánicas que producen calor, contaminantes y consumen energía eléctrica.

10. Desarrollos futuros

Entre las razones que frenan mucho el uso de esta tecnología innovadora hay dos aspectos: en primer lugar, el elevado coste del material, pero sobre todo la cuestión de la durabilidad. En efecto, se ha estudiado que el material polimérico del que se componen los termocrómicos es inadecuado para una exposición prolongada a la radiación ultravioleta. En efecto, parece que puede haber rupturas a nivel químico que alteran las características principales de reflectancia y emisividad, en particular aquellas en las que el albedo de partida es mayor. Esta característica va a impedir que estos materiales se puedan aplicar en casos reales.

Si en el futuro se resuelve esta situación crítica, combinada con una reducción de los precios, estos materiales, junto con otras intervenciones específicas, podrían convertirse en un instrumento muy interesante e importante para mitigar las temperaturas en las ciudades.

Referencias

Amoirhossein B. , E V. Alireza, «Identification And Selection Of Building Façade's Smart Materials,» *Sustainable Materials And Technologies*, 2020.

Bassolino E. , «Climate Adaptive Design Strategies For The Built Environment».

Battistella L., «Il Fenomeno Dell'isola Di Calore Urbana A Padova: Analisi Dei Dati E Scenari Di Mitigazione,» 2014.

Berardi U., M. Garai E T. Morselli, «Preparation And Assessment Of The Potential Energy Savings Of,» *Solar Energy*, 2020

Beretta S., *Gli Effetti Del Verde Sulla Mitigazione Dell'isola Di Calore Urbana*, 2012.

Bianco L., «Involucri trasparenti innovativi. Modellazione e sperimentazione su componenti dinamici e sistemi di facciata attivi,» Torino, 2014.

Bisson M. , «Simulazione Del Microclima Urbano Di Milano Mediante Il Software Envi-Met Studio Degli Effetti Dell'inserimento Di Aree Verdi Sulla Sollecitazione Termica Degli Edifici,» 2010

Bonafè G., «Microclima Urbano: Impatto Dell'urbanizzazione Sulle Condizioni Climatiche Locali E Fattori Di Mitigazione,» 2006.

Bottalico M., «Materialie Processi Innovativi Per L'integrazione Elettrocromico/Fotovoltaico,» 2020.

Cannavale A., «Chromogenic Technologies for Energy Saving», (2020)

Caputo F., «Citta' Resiliente E Isola Di Calore Urbana: Le Aree Verdi Di Piazza Aspromonte A Milano,» 2014.

Fabiani C., V. Castaldo E P. A. L., «Thermochromic Materials For Indoor Thermal Comfort Improvement: Finite Difference Modeling And Validation In A Real Case-Study Building,» *Applied Energy*, 2020.

Fabiani C. , A. L. Pisello, E. Bou-Zeid, J. Yang E F. Cotana, «Adaptive Measures For Mitigating Urban Heat Islands: The Potential Of Thermochromic Materials To Control Roofing Energy Balance,» *Applied Energy*, 2019

Farshad K., «A Multistage Recursive Approach In Time- And Frequency-Domain For Thermal Analysis Of Thermochromic Glazing And Thermostatic Control Systems In Buildings,» *Solar Energy*, 2020.

Garshabi S., S. Haddad , R. Paolini, M. Santamouris , G. Papangelis, A. Dandou , G. Methymaki, P. Portalakis E M. Tombrou, «Urban Mitigation And Building Adaptation To Minimize The Future Cooling Energy Needs,» *Solar Energy*, 2020.

Garshasbi S. , M. Santamouris, «Using Advanced Thermochromic Technologies In The Built Environment: Recent Development And Potential To Decrease The Energy Consumption And Fight Urban Overheating,» *Solar Energy Materials And Solar Cells*, 2019.

Gerundo C., «Città E Clima: Forma Urbana E Adattamento Ai Cambiamenti Climatici».

V. Granadeiro V., M. Almeida, T. Souto , V. Leal, J. Machado E A. Mendes, «Thermochromic Paints On External Surfaces: Impact Assessment For A Residential Building Through Thermal And Energy Simulation,» *Energies*, 2020.

Granqvist C.G., A. Azens, A. Hjelm, L. Kullman, G.A.Niklasson, D.Ronnow, M. Strømme Mattsson, M. Veszelei, G. Vaivars, « Recent Advances In Electrochromics For Smartwindows Applications» *Solar Energy*, Vol 63, No. 4, pp. 199-216, 1998

Jiaying H. , Y. X. Bill, «Adaptive Thermochromic Roof System: Assessment Of Performance Under Different Climates,» *Energy And Buildings*, 2019.

Hu J. Y. X. Bill, «Adaptive Building Roof By Coupling Thermochromic Material And Phase,» *Construction And Building Materials*, 2020.

Hu J. X. B. Yu, «Design And Characterization Of Energy Efficient Roofing System With Innovative Tio2 Enhanced Thermochromic Films,» *Construction And Buildings Materials*, 2019.

J. Hu J. X. B. Yu, «Adaptive Thermochromic Roof System: Assessment Of Performance Under Different Climates,» *Energy And Buildings*, 2019.

Karlessi T., M. Santamouris, K. Apostolakis, A. Synnefa E J. Livada, «Development And Testing Of Thermochromic Coatings For Buildings And Urban Structures,» *Solar Energy*, 2009.

Karlessi T., M. Santamouris, «Improving The Performance Of Thermochromic Coatings With The Use Of Uv And Optical Filters Tested Under Accelerated Aging Conditions,» *International Journal Of Low-Carbon Technologies*, Vol. 10, N. 10, P. 45–61, 2015.

Karlessi T., M. Santamouris, A. Synnefa, D. Assimakopoulos, P. Didaskalopoulos E K. Apostolakis, «Development And Testing Of Pcm Doped Cool Colored Coatings To Mitigate Urban,» *Building And Environment*, N. 46, Pp. 570-576, 2011.

Kolotska D. D., G. Giannariakis, K. Gobakis, G. Giannarakis, A. Synnefa E M. Santamouris, «Cool Roofs And Cool Pavements Application In Acharnes, Greece,» *Sustainable Cities And Society*, N. 37, Pp. 466-474, 2018.

Lale C., K. Semra, A. Erhan E M. Y. Çimen, «Control Of Temperature Changes In Daily Life With Thermochromic Green Pigments,» *Materials Letters*, 2020.

Lee Y.-L., Y.-H. Chang, J.-L. Li E C.-Y. Lin, «Using Intelligence Green Building Materials To Evaluate Color Change Performance,» *Sustainability*, 2020.

Li Q., T. Hu, S. Luo, L. Gai , C. Wang E Y. Guan, «Evaluation Of Cooling Effect And Pavement Performance For Thermochromic Material Modified Asphalt Mixtures Under Solar Radiation,» *Construction And Buildings Materials*, 2020.

Li S. Y., G. A. Niklasson E C. G. Granqvist, «Thermochromic Fenestration With Vo₂-Based Materials: Three Challenges And How They Can Be Met,» *Thin Solid Films*, 2012.

Liang R., Y. Sun, M. Aburas, R. Wilson E Y. Wu, «Evaluation Of The Thermal And Optical Performance Of Thermochromic Windows For Office Buildings In China,» *Energy And Buildings*, 2018.

Mat S., «Analyzing The Heat Island Magnitude And Characteristics In One Hundred Asian And Australian Cities And Regions,» *Science Of The Total Environment*, N. 512-513, Pp. 582-598, 2015

Martinelli A., D. Kolotska, F. Fiorito, «Urban Heat Island in Mediterranean Costal Cities: The case of Bari (Italy)» *Science*, 2020

Mann D., C. Yeung, R. Habets, Z. Vroon E P. Buskens, «Comparative Building Energy Simulation Study Of Static And Thermochromically Adaptive Energy-Efficient Glazing In Various Climate Regions,» *Energies*, 2020.

Neves, R., 2001. *Use of thermochromic black pigments on white textile or coating materials, to save energy in buildings or other closed spaces.* Word Intellectual Property Organization, Patent No. 92633.

Oke T., *The Heat Island Of The Urban Boundary Layer: Characteristics, Causes And Effects*, Vancouver, B.C., 1995.

Pantavou K., G. Theoharatos, A. Mavrakis E M. Santamouris, «Evaluating Thermal Comfort Conditions And Health Responses During An Extremely Hot Summer In Athens,» *Building And Environment*, N. 46, Pp. 339-344, 2011.

Park, B. M. Krarti , «Energy Performance Analysis Of Variable Reflectivity Envelope Systems For Commercial Buildings,» *Energy And Buildings*, 2016.

Perez G., C. Mota-Heredia, J. A. Sanchez-Garcia E A. Guerrero, «Compatibility Between Thermochromic Pigments And Portland Cement-Based Materials,» *Construction And Buildings Materials*, 2020.

Rossi S., M. Simeoni E A. Quaranta, «Behavior Of Chromogenic Pigments And Influence Of Binder In Organic Smart Coatings,» *Dyes And Pigments*, 2021.

Sakuldeemeekiat T., N. Luamsri, J. Wootthikanokkhan E M. Phiriyawirut, «The Effects Of Thermochromic Pigments On Optical, Mechanical, And Heat Insulation Roperties Of Plasticized Pvc Window Film,» *Journal Of Thermoplastic Composite Materials*, 2020.

Salvati A., H. C. Roura E C. Cecere, «Assessing The Urban Heat Island And Its Energy Impact On Residentialbuildings In Mediterranean Climate: Barcelona Case Study,» *Energy And Buildings*, N. 146, Pp. 38-54, 2017.

Santamouris M., R. Paolini, S. Haddad, A. Synnefa, S. Garshasbi, G. Hatvani-Kovacs, K. Gobakis, K. Yenneti, K. Vasilakopoulou, J. Feng, K. Gao, G. Papangelis, A. Dandou, G. Methymaki, P. Portalakis E M. Tombrou, «Heat Mitigation Technologies Can Improve Sustainability In Cities. An Holistic Experimental And Numerical Impact Assessment Of Urban Overheating And Related Heat Mitigation Strategies On Energy

Consumption, Indoor Comfort, Vulnerability And Heat-Related M,» *Energy And Buildings*, N. 217, 2020.

Santamouris M., C. Cartalis, A. Synnefa E D. Kolotska, «On The Impact Of Urban Heat Island And Global Warming On The Powerdemand And Electricity Consumption Of Buildings—A Review,» *Energy And Buildings*, N. 98, Pp. 192-124, 2015.

Santamouris M., «Cooling The Buildings – Past, Present And Future,» *Energy And Buildings*, N. 128, Pp. 617-638, 2016

Sottana M., «Analisi Sperimentale Del Fenomeno "Isola Di Calore Urbano" Nella Citta' Di Padova,» 2012.

Soudian S., U. Berardi E N. Laschuk, Development And Thermal-Optical Characterization Of A Cementitious Plaster, *With Phase Change Materials And Thermochromic Paint*, 2020.

Synnefa A., A., Dandou, M., Santamouris, M., Tombrou,. «An energy efficient solution to mitigate heat islands and reduce cooling energy loads. » In: Braganca, L. (Ed.), *Proceedings of Sustainable Buildings, International Conference, Lisbon, Portugal*, pp. 895– 902. 2007a

Synnefa A., M. Santamouris E I. Livada, «A Study Of The Thermal Performance Of Reflective Coatings For The Urban Environment,» *Solar Energy*, N. 80, Pp. 968-981, 2006

Synnefa A., M. Santamouris E H. Akbari, «Estimating The Effect Of Using Cool Coatings On Energy Loads And Thermal Comfort In Residential Buildings In Various Climatic Conditions,» *Energy And Buildings*, N. 39, Pp. 1167-1174, 2007b.

Synnefa A., M. Santamouris E K. Apostolakis, «On The Development, Optical Properties And Thermal Performance Of Cool Colored Coatings For The Urban Environment,» *Solar Energy*, N. 81, Pp. 488-497, 2007c.

Triggiano A.A., «Analisi Prestazionale Di Involucri Con Materiali A Cambiamento Di Fase: Integrazione Impiantistica,» Bari, 2020.

Tsoka S., A. Tsikaloudaki E T. Theodosiou, «Analyzing The Envi-Met Microclimate Model's Performance And Assessing Cool Materials And Urban Vegetation Applications—A Review,» *Sustainable Cities And Society*, N. 43, Pp. 55-76, 2018.

Tsoka S., E. Litserinon E K. Tsikaloudaki, «Evaluating The Effect Of Cool Materials On Microclimatic Variables Under Different Meteorological Conditions. Application In The City Of Thessaloniki,» 2017.

Young Y. G., M. Santamouris, «Recent Development And Research Priorities On Cool And Super Cool Materials To Mitigate Urban Heat Island,» *Renewable Energy*, 2020.

Yang J., D. L. M. Kumar , A. Pyrgou, A. Chng, M. Santamouris, D. Kolotska E S. E. Lee, «Green And Cool Roofs' Urban Heat Island Mitigation Potential In Tropical Climate,» *Solar Energy*, N. 173, Pp. 597-609, 2018.

Yuxuan Z., Z. Yunyun, Y. Jianrong E Z. Xiaoqiang, «Energy Saving Performance Of Thermochromic Coatings With Different Colors For Buildings,» *Energy And Buildings*, 2020.

Zhang Y. , X. Zhai, «Preparation And Testing Of Thermochromic Coatings For Buildings,» *Solar Energy*, N. 191, Pp. 540-548, 2019.

Webgrafia

<https://www.iconacliama.it/approfondimenti/isola-di-calore-mitigazione/>

<https://www.green.it/materiali-edili-innovativi/#>

<https://www.ilpost.it/2019/06/25/isole-calore-urbane/>

[https://societaeconomica.com/2018/10/come-funzionano-i-materiali-termocromici-che-cambiano-colore/#:~:text=Le%20Leucodiche%20sono%20sostanze%20chimiche,e%20non%20leuco%20\(colorate\).](https://societaeconomica.com/2018/10/come-funzionano-i-materiali-termocromici-che-cambiano-colore/#:~:text=Le%20Leucodiche%20sono%20sostanze%20chimiche,e%20non%20leuco%20(colorate).)

<http://cetemps.aquila.infn.it/materiali-altamente-riflettenti-in-aree-urbane-mitigazione-delleffetto-isola-urbana-ma-degrado-della-qualita-dellaria/>

<https://www.iconacliama.it/approfondimenti/isola-di-calore-mitigazione/>

<https://www.researchgate.net/>

<http://195.45.76.147/dataset/centraline-meteo>

https://www.casaclima.com/ar_39278__ITALIA-Ultime-notizie-isola-di-calore-caldo-Effetto-isola-di-calore-urbana-le-Linee-di-indirizzo-del-Ministero-della-salute.html

www.arpa.puglia.it