

TERMOGRAFÍA DEL CAÑÓN URBANO

**USO DE LA PERSPECTIVA PARA UNA EVALUACIÓN TÉRMICA
GLOBAL DE LA CALLE**

Presentada por:

ELENA GARCÍA NEVADO

Dirigida por:

HELENA COCH ROURA

Programa de Doctorado en:

ARQUITECTURA, ENERGÍA Y MEDIO AMBIENTE

DEPARTAMENTO DE TECNOLOGÍA DE LA ARQUITECTURA

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE ARQUITECTURA DE BARCELONA (ETSAB)

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CATALUÑA (UPC)

Barcelona, Enero de 2019

*Imagen de portada:
Termografía urbana de Bayonne (Elaboración Propia)*

Agradecimientos

A Helena Coch, directora de mi Tesis, por haberme dado la oportunidad de realizar el doctorado y haberme acompañado hasta el final.

A los compañeros del grupo de investigación en Arquitectura, Energía y Medio Ambiente de la Escuela de Arquitectura de Barcelona, por sus ánimos y por todo lo que en estos años me han enseñado.

A Benoit Beckers, supervisor de mi estancia en l'Université de Pau et des Pays de l'Adour de Anglet, Francia, por sus valiosos consejos y su paciencia infinita.

A los colegas de Barcelona y Anglet con quienes tuve la suerte de recorrer el apasionante camino del doctorado, por toda la ayuda que me brindaron. Especialmente a Antonio J. Leal, Jefferson Torres, Gilkauris Rojas, Badia Masoud, Bruno Oliveira, Agnese Salvati, Antoine Bugeat, Raphaël Nahon, Loreto García, Jairo Acuña, Fannia Pacheco y cómo no, a Carlos F. López.

Finalmente, un agradecimiento especial a mis amigos y, sobre todo, a mi familia, cuyo apoyo incondicional hizo posible lograr este objetivo.

Esta tesis ha sido financiada por la Ayuda para la Formación de Profesorado Universitario otorgada por el Ministerio de Educación, Cultura y Deporte de España (FPU-13/0388). Durante la estancia de investigación en el extranjero que permite la obtención del Doctorado con Mención Internacional, se contó con una Beca de Movilidad Internacional para Doctorandos concedida por La Caixa y la Universidad Politécnica de Cataluña.

ÍNDICE

RESUMEN ABSTRACT	9
INTRODUCCIÓN	11
I. JUSTIFICACIÓN DEL TEMA	13
II. HIPÓTESIS DE TRABAJO	17
III. OBJETIVOS	18
IV. METODOLOGÍA Y ESTRUCTURA DE LA TESIS	19
INTRODUCTION	21
I. WORK MOTIVATION	23
II. WORK HYPOTHESIS	27
III. AIMS OF THE WORK	28
IV. METHODOLOGY AND THESIS STRUCTURE	29
CAPÍTULO 1: CIUDAD COMPACTA, SOSTENIBILIDAD Y ENERGÍA	31
<hr/>	
1.1 INTRODUCCIÓN	33
1.2 LA CIUDAD COMPACTA COMO ALTERNATIVA AL URBAN SPRAWL	34
1.3 DEFINICIÓN DE LA CIUDAD COMPACTA	37
1.4 TRAMAS COMPACTAS: RESILIENCIA Y ACTUALIDAD	41
1.5 COMPORTAMIENTO ENERGÉTICO DE LA CIUDAD COMPACTA	44
1.6 ORIGEN E INTERÉS DE LAS TRAMAS COMPACTAS ESTUDIADAS	50
1.6.1 Córdoba, una densificación medieval	51
1.6.2 Bayona, una densificación moderna	60
1.7 CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO	66
CAPÍTULO 2: TERMOGRAFÍA EN AMBIENTE URBANO	67
<hr/>	
2.1 INTRODUCCIÓN	69
2.2 BALANCE DE ENERGÍA SUPERFICIAL	70
2.3 PRINCIPIOS FÍSICOS DE LA TERMOGRAFÍA	78
2.4 ESTADO DEL ARTE DE LA TERMOGRAFÍA EN AMBIENTES URBANOS	83
2.4.1 Alcance espacial de los estudios	85
2.4.2 Temporalización de las medidas	85
2.4.3 Técnica de medición	87
2.4.4 Procedimientos de adquisición de datos	87
2.4.5 Enfoque de análisis	88
2.4.6 Finalidad del estudio	89
2.4.7 Estado térmico analizado	90
2.4.8 Dos reflexiones a partir de la revisión bibliográfica	91
2.5 LA PERSPECTIVA EN TERMOGRAFÍA Y SUS IMPLICACIONES	95
2.5.1 El interés de la perspectiva termográfica en ambientes urbanos compactos	95
2.5.2 Consecuencias de la termografía perspectiva	99

2.6 LA VARIABILIDAD ANGULAR DE LA EMISIVIDAD	102
2.6.1 Bases físicas del fenómeno	102
2.6.2 Consecuencias sobre la interpretación de las termografías	104
2.6.3 Cuantificación de los efectos de la variación angular de la emisividad	108
2.7 CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO	120

CAPÍTULO 3: METODOLOGÍA DE ANÁLISIS DE SECUENCIAS DE TERMOGRAFÍAS URBANAS **123**

3.1 INTRODUCCIÓN	125
3.2 DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA METODOLOGÍA DE ANÁLISIS	126
3.3 PREPARACIÓN DE LA CAMPAÑA DE MEDICIÓN	127
3.3.1 Selección de punto/s de medición	127
3.3.2 Temporalización de las mediciones	129
3.3.3 Modelización del entorno urbano	130
3.4 RECOGIDA DE DATOS EXPERIMENTALES	134
3.4.1 Toma de imágenes termográficas y fotográficas	134
3.4.2 Registro de condiciones ambientales	135
3.5 PROCESAMIENTO DE IMÁGENES TERMOGRÁFICAS	136
3.6 ANÁLISIS DE RESULTADOS	138
3.6.1 Análisis basado en imágenes	138
3.6.2 Análisis basado en gráficos numéricos	139
3.7 DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES	141

CAPÍTULO 4: ANÁLISIS DE SECUENCIAS DE TERMOGRAFÍAS EN UN CAÑÓN URBANO **143**

4.1 INTRODUCCIÓN	145
4.2 CASO DE ESTUDIO 1: RUE DES TONNELIERS, BAYONNE	147
4.2.1 Descripción del caso de estudio	147
4.2.2 Toma de datos experimentales	155
4.2.3 Procesamiento de los resultados	159
4.2.4 Análisis y discusión de resultados	160
4.2.5 Comentarios finales del caso de estudio	175
4.3 CASO DE ESTUDIO 2: CALLE DE LAS REJAS DE DON GOME, CÓRDOBA	177
4.3.1 Descripción del caso de estudio	177
4.3.2 Toma de datos experimentales	184
4.3.3 Procesamiento de los resultados	188
4.3.4 Análisis de resultados basado en imágenes	193
4.3.5 Análisis de resultados basado en gráficos numéricos	199
4.3.6 Comentarios finales del caso de estudio	213
4.4. CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO	215

**CAPÍTULO 5: EVALUACIÓN TÉRMICA DE UN ÁREA URBANA MEDIANTE
SECUENCIAS DE TERMOGRAFÍAS** **219**

5.1 INTRODUCCIÓN	221
5.2 ANTECEDENTES DE ESTE TRABAJO	223
5.3 DESCRIPCIÓN DEL CASO DE ESTUDIO	227
5.3.1. Características geométricas del entorno	227
5.3.2. Características materiales del entoldado	231
5.4 DESCRIPCIÓN DE LA CAMPAÑA DE MEDICIÓN	233
5.4.1 Condiciones ambientales durante la medición	233
5.4.2 Post-tratamiento de datos	237
5.5 RESULTADOS	238
5.5.1 Evolución de las temperaturas superficiales de un cañón Este-Oeste	238
5.5.2 Evolución de las temperaturas superficiales de un cañón Norte-Sur	240
5.6 DISCUSIÓN	241
5.6.1 Discusión del efecto del toldo sobre las temperaturas superficiales según la orientación	241
5.6.2 Discusión del efecto del toldo sobre las temperaturas superficiales según su materialidad	257
5.6.2 Discusión del efecto del toldo sobre el confort del usuario	261
5.7 CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO	265

CAPÍTULO 6: CONCLUSIONES **269**

6.1 APORTACIONES DE LA INVESTIGACIÓN	271
6.2 CONCLUSIONES FINALES	275
6.3 POSIBLES FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN	278

CHAPTER 6: CONCLUSIONS **279**

6.1 FINDINGS COMPILATION	281
6.2 FINAL CONCLUSIONS	285
6.3 POSSIBLE FUTURE RESEARCH LINES	288

BIBLIOGRAFÍA **289**

LISTADO DE FIGURAS Y TABLAS **305**

ANEXOS

ANEXO A: SECUENCIAS TERMOGRÁFICAS DESDE UNA POSICIÓN FIJA	AN. 5
ANEXO B: SECUENCIAS TERMOGRÁFICAS SIGUIENDO UN RECORRIDO	AN.159
ANEXO C: RUTINA PARA EL ANÁLISIS DE DATOS TERMOGRÁFICOS	AN.255
ANEXO D: CARACTERÍSTICAS DEL INSTRUMENTAL DE MEDICIÓN	AN.269
ANEXO E: CARACTERIZACIÓN DE LOS TOLDOS	AN.277
ANEXO F: COMPORTAMIENTO EN INFRARROJO DE LOS MATERIALES	AN.289

“The joy and pain of urban existence, the comfort or hardship of it, its efficiency or failure are influenced by the wisdom or the thoughtlessness with which streets are platted.” C.M. Robinson en 1911 (Southworth & Ben-Joseph 1997).

“If our ability to feel were as sensitive as our eye, it is probable that just as different rays of light produce on us different sensations which we designate by the name of colors, so the different rays of heat would thus produce different impressions on us. We are with respect to heat like those who cannot distinguish colors and are not affected other than by the greater or less intensity of the luminous rays.” Macedonio Melloni, en el siglo XIX (Barr 1962).

RESUMEN

Muchas de las actividades diarias de los ciudadanos tienen lugar en la calle. De las condiciones ambientales existentes en estos espacios depende, en gran medida, el grado de confort de sus usuarios y, con ello, su percepción ambiental de la ciudad. Además, el clima a nivel de calle influye sobre el comportamiento energético de los edificios, afectando, por tanto, a la cantidad de energía necesaria para lograr el confort en su interior y, por extensión, al consumo energético global de la ciudad.

Las condiciones ambientales de la calle son consecuencia de complejos intercambios de energía entre el aire y sus superficies. A nivel térmico, el resultado de este balance se expresa mediante la temperatura superficial. En esta tesis doctoral, se investigan las posibilidades de las secuencias de termografías como herramienta de análisis de la evolución temporal y distribución espacial de las temperaturas sobre las superficies del cañón urbano. La investigación se centra en calles de tejidos urbanos compactos, morfologías cuyo comportamiento térmico aún no es del todo comprendido. Se plantea qué se puede aprender sobre el ambiente térmico de este tipo de calles, contando con una cámara comercial, un técnico y un día de medición, condiciones asimilables a la etapa inicial de proyecto. Contando con estos recursos, la propia geometría del entorno lleva a tomar las termografías en perspectiva para maximizar la información obtenida en cada imagen. Este enfoque, innovador dentro de los usos habituales de la termografía en ambientes construidos, introduce, sin embargo, una serie de retos en la interpretación de los resultados. El más importante es la existencia de una desviación entre las temperaturas obtenidas desde tomas frontales y oblicuas. Gracias a diversos tests experimentales, se comprueba que, en el caso de cañones urbanos compactos, las ventajas de tener una visión global térmica de la calle compensan sobradamente la ligera disminución de la precisión introducida por la perspectiva.

Partiendo de este enfoque, esta tesis estudia los efectos sobre el comportamiento térmico de las superficies del cañón urbano de dos tipos de intervenciones arquitectónicas: el cambio de la reflectividad de las fachadas y la instalación de dispositivos de sombra a escala de calle. Para llevar a cabo estos análisis térmicos, es necesario desarrollar una metodología propia de adquisición y procesamiento de secuencias termográficas. Dicho método se aplica en diversas calles, similares en su geometría pero diferentes desde un punto de vista material y de diseño, lo que permite comparar térmicamente los distintos casos de estudio. Desde el punto de vista metodológico, se concluye que el método diseñado constituye una herramienta eficaz para mejorar nuestra comprensión de los fenómenos térmico-radiativos que tienen lugar a la escala de calle. A nivel arquitectónico, los resultados muestran el potencial de ambas intervenciones para modificar el ambiente radiativo del cañón urbano, tanto en ondas cortas como largas, registrándose variaciones notables de la temperatura superficial. En el actual contexto de crisis energética y ambiental, conocer las características del microclima de la calle, y los mecanismos que lo gobiernan, resulta prioritario para guiar el proyecto urbano hacia modelos más sostenibles.

ABSTRACT

Many of the citizen's daily activities take place in the streets. Climatic conditions in between buildings largely affect the user's comfort of these spaces, and, consequently, the human perception of the city environment. Additionally, the climate at street level influences environmental conditions inside buildings, affecting, therefore, the amount of energy needed to achieve indoor comfort and, by extension, the global city energy consumption.

Street environmental conditions are the result of complex energy exchanges between the air and built surfaces. From a thermal point of view, the result of this balance is expressed by the surface temperature. This doctoral thesis investigates the possibilities of thermographic time-lapses as a tool for the analysis of the time evolution and the space distribution of temperatures over the urban canyon surfaces. The study focuses on streets within compact urban tissues, built morphologies whose thermal behavior is not well-understood yet. This research explores what can be learned about the thermal performance of these urban canyons only with a commercial infrared camera operated by one person for a day, feasible conditions for the early stage of urban projects. With such limited resources, the geometry of the street leads to the shot of thermographies in perspective to maximize the information obtained from an individual image. This approach, which can be considered innovative among the uses of thermography technique in the built environment, introduces some challenges regarding the results interpretation. The most important one is the presence of a temperature deviation between frontal and oblique views. Several experimental tests help to demonstrate that, within compact urban canyons, advantages of the global thermal view of the street clearly compensate the slight accuracy loss associated to the perspective view.

Based on this approach, this thesis studies the impact of two kind of architectural interventions on the thermal behavior of street surfaces: the change in the façade reflectivity and the installation of shading devices at a street scale. To perform these thermal analyses, it is necessary to develop a new method for the acquisition and post-processing of thermographic image sequences. This method is implemented on several streets with similar geometry, but with differences regarding its material composition and design, allowing the comparison among the case studies. From a methodological point of view, it is stated that the method developed in the thesis constitutes an effective tool for a better understanding of the thermo-radiative phenomena taking place within the streets. From an architectural point of view, results demonstrate the potential of the two interventions assessed to modify the street radiative environment, both in short and longwave, as shown by the remarkable differences in surface temperature found between cases. In the current context of environmental and energy crisis, knowing the characteristics of the microclimate at this scale, and the mechanisms that drive it, is a priority to guide urban projects towards more sustainable models.

INTRODUCCIÓN

- I. JUSTIFICACIÓN DEL TEMA DE ESTUDIO**
- II. HIPÓTESIS DE TRABAJO**
- III. OBJETIVOS**
- IV. METODOLOGÍA Y ESTRUCTURA DE LA TESIS**

I. JUSTIFICACIÓN DEL TEMA

Desde sus orígenes, el diseño de la ciudad se ha visto influenciado, a varios niveles, por factores climáticos. Éstos han condicionado desde las características materiales y formales de los edificios, hasta la manera en que las edificaciones se agrupan en tejidos urbanos e incluso su implantación dentro del territorio. La consideración histórica del clima en el diseño se hace evidente, por ejemplo, en las diferencias entre las arquitecturas vernáculas de las distintas regiones del mundo (Figura 1) y en la variedad formal y material presente en las ciudades históricas (Coch 1998; Serra Florensa 1999; Olgay 1963; Higuera 2006).



Figura 1. Ejemplos de estrategias arquitectónicas vernáculas (Coch 1998)

Durante los últimos dos siglos, ha existido un creciente interés por explicar científicamente que, en realidad, la influencia entre clima y ciudad es recíproca. Es decir, las preexistencias climáticas condicionan el diseño de la ciudad y, a su vez, el diseño de la ciudad modela el clima de la región, creando en dicho entorno urbano unas condiciones ambientales propias. El primer tratado monográfico sobre este *clima urbano* se publicó hace justo 200 años por Luke Howard (1818), quien evidenció la existencia de la *Isla de Calor* al comparar las lecturas de termómetros situados dentro y fuera de Londres. Y, desde entonces, los estudios sobre el tema se han multiplicado (Landsberg 1981). Dado que el *clima de la ciudad* tiene efectos directos sobre la calidad de vida y la salud de los ciudadanos, conocer sus características y las dinámicas que lo gobiernan resulta un aspecto crucial para la sociedad actual (Moonen et al. 2012). Esta necesidad se hace especialmente evidente si tenemos en cuenta que más de la mitad de la población mundial habita ya en ciudades y que para 2050 se alcanzarán los dos tercios, lo que supone 6.500 millones de *urbanitas* (United Nations 2014).

En las últimas décadas, gracias a los avances en las técnicas de adquisición y tratamiento de datos, ha sido posible demostrar que los efectos de la ciudad sobre el clima no se limitan a su entorno más próximo, sino que alcanza una escala planetaria. Numerosos estudios científicos señalan a las zonas urbanas como el principal motor del cambio climático y, paradójicamente, como estructuras especialmente sensibles a sus efectos (United Nations 2011). Una parte importante de las emisiones de efecto invernadero causantes de este calentamiento global se deriva de la energía consumida en los edificios, destinada en gran proporción a mantener ambientes interiores confortables (Burdett & Sudjic 2011). A su vez, la cantidad de energía necesaria para conseguir este objetivo dependerá de las condiciones ambientales que existan fuera del mismo, es decir, del *microclima urbano*.

INTRODUCCIÓN

De esta reflexión casi circular sobre la relación entre clima y ciudad, se pueden extraer tres conclusiones. En primer lugar, que ciudad y clima son dos realidades que se influyen mutuamente, con interacciones a diferentes escalas, no siempre evidentes. En segundo lugar que, en función de la escala de estudio, los fenómenos climáticos que se pueden analizar son diferentes, como también lo son los medios necesarios para ello. Y en tercer lugar, que el clima es una realidad cambiante, sobre la que se puede influir activamente.

En este sentido, la *modificación del clima urbano* a través de un diseño urbano adecuado se presenta como una posible estrategia para mejorar la calidad de vida de las personas y, a la vez, reducir las consecuencias ambientales de sus actividades. Sin embargo, a pesar de las demostradas ventajas de un planeamiento urbano “climáticamente consciente”, los avances de la climatología urbana encuentran dificultades a la hora de ser incorporados en el proceso de proyecto, debido a una combinación de factores que interactúan de una forma compleja (Erell 2008; Mills et al. 2010; Grimmond et al. 2010).

Por un lado, a pesar de décadas de investigación sobre la *Física Urbana*, nuestro conocimiento sobre los procesos energéticos que gobiernan el clima urbano es todavía limitado como para aportar argumentos sólidos de proyecto (Beckers 2016). Esta situación afecta particularmente a los **intercambios radiativos, sobre todo en ambientes construidos densos**, donde las interacciones entre flujos en ondas cortas y largas aún no son bien entendidas (Ghandehari et al. 2018).

Por otro lado, existe una contradicción entre la escala típica de los estudios de clima urbano (ciudad/tejido urbano) y en la que se materializa realmente el proyecto arquitectónico (elemento constructivo/edificio). En este sentido, se plantea el interés **de trabajar a escala de calle**, como posible escala intermedia de encuentro entre ambas disciplinas.

Además, existen dificultades a la hora de “urbanizar” los datos meteorológicos convencionales, es decir, **faltan datos experimentales en entornos reales** que evidencien la relación entre las características de la ciudad y el microclima generado (Mills et al. 2010). Esta carencia es especialmente notable a nivel de calle, donde la toma de datos resulta especialmente compleja.

De estas tres cuestiones nace el marco temático general de la tesis: **el estudio de los intercambios radiativos que tienen lugar dentro de las calles de tramas urbanas compactas**. La radiación a nivel de calle constituye un aspecto del clima urbano con importantes repercusiones energéticas:

- **Para el peatón:**

El **confort térmico** del peatón depende del intercambio de energía entre éste y su entorno, un balance en el que los flujos radiativos en ondas cortas y largas pueden tener un gran peso (Fanger 1972; Serra & Coch 2009). En ambientes urbanos complejos, estos flujos experimentan notables variaciones espacio-temporales, constituyendo un parámetro complejo de evaluar. Las dificultades son aún mayores por lo que respecta a las ondas largas, un factor que puede ser determinante en el caso de entornos urbanos ocluidos, especialmente en situación de verano (Ali-Toudert & Mayer 2006; Kántor & Unger 2011).

- **Para el edificio:**

El comportamiento ambiental de los edificios, y con ello, su **demanda energética**, está condicionado por los intercambios de energía a través de su envolvente, donde los flujos de radiación a través de su fachada han demostrado tener un papel principal (Bouyer et al. 2011). El estudio de relación entre radiación y demanda se ha centrado mayoritariamente en la influencia de la radiación solar sobre los requerimientos energéticos para climatización e iluminación (ej. Strømman-Andersen & Sattrup 2011). Sin embargo, el efecto de los flujos de radiación en ondas largas sobre el comportamiento de los edificios constituye un aspecto mucho menos tratado, especialmente en entornos urbanos compactos (Evins et al. 2014).

- **Para la ciudad:**

Los aspectos radiativos influyen de manera directa e indirecta sobre el comportamiento energético de los tejidos urbanos, y con ello, de la ciudad en su conjunto. Por un lado, la demanda energética de los tejidos será el resultado directo de la **suma de las demandas individuales** de las edificaciones que los conforman, notablemente condicionadas por los flujos de radiación. Por otro, las interacciones energéticas dentro del cañón generan efectos indirectos sobre las condiciones ambientales de los tejidos, que a su vez influyen sobre el clima a escala urbana. El más conocido de estos efectos es la existencia de una *Isla de Calor Urbana*, fenómeno que presenta mayor intensidad en geometrías urbanas muy ocluidas, debido a un mayor atrapamiento radiativo (Oke 1987).

En definitiva, observamos que tanto desde el punto de vista del confort como del consumo energético, los estudios de radiación a escala de calle se han centrado en ondas cortas (Harman 2004). La menor atención recibida por los intercambios en ondas largas explica, en parte, la limitada incorporación de los aspectos térmicos en el proyecto urbano y justifica el interés de analizar las temperaturas de las superficies del cañón de una manera global.

Una de las causas de la predominancia de los análisis en ondas cortas sobre los de ondas largas es la disponibilidad de herramientas para visualizar y cuantificar cada uno de estos fenómenos. En el caso de la radiación solar, las herramientas de estudio son variadas y asequibles: maquetas físicas, fotografías de entornos reales y/o simulaciones sobre maquetas virtuales. Por el contrario, las opciones para estudiar las ondas largas, parte “invisible” de la radiación, son mucho más limitadas. Por un lado, no existe la posibilidad de realizar maquetas, ya que las propiedades térmicas de los materiales son casi imposibles de escalar. Por otro, a diferencia de lo que ocurre en luz visible, los software de simulación actuales son escasos, poco interactivos y requieren tiempos de cálculo muy prolongados (Gros et al. 2011). Dentro de este contexto, **la termografía** subraya su potencial como técnica para el análisis térmico en entornos construidos.

INTRODUCCIÓN

La principal ventaja de la termografía respecto a otras técnicas de medición directas de temperatura es el hecho de que la información que proporciona está **especializada**. Estos datos térmicos pueden verse enriquecidos si se realizan secuencias termográficas, al añadirse la **dimensión temporal** de los fenómenos. La posibilidad de estudiar la evolución de las temperaturas de las superficies urbanas en el tiempo y en el espacio, abre la puerta a una mejor comprensión de los procesos térmicos que ocurren en el medio construido, como punto de partida necesario para el proyecto urbano.

Una ventaja añadida de las técnicas de medición infrarroja es que, gracias a los avances tecnológicos de las últimas décadas, **las cámaras termográficas se han convertido en dispositivos accesibles**, a un coste relativamente reducido. Sin embargo, como señalan Vollmer & Möllmann (2010), este hecho ha conducido a la paradoja de que: *“there are probably more cameras sold worldwide than there are people who understand the physics behind and who know how to interpret the nice and colorful images of the false color displays”*. Efectivamente, las cámaras infrarrojas son capaces de producir termografías de forma casi instantánea pero, desgraciadamente, **su interpretación puede llegar a ser compleja** en muchas ocasiones, incluso para técnicos con conocimientos sobre la física del infrarrojo y amplia experiencia en el manejo de la cámara.

Si a los retos que plantea la interpretación de la termografía, añadimos la complejidad inherente de la ciudad, el estudio de la termografía urbana se convierte en un área de investigación de gran potencial y que, a la vez, plantea notables desafíos.

II. HIPÓTESIS DE TRABAJO

Esta tesis se centrará en el estudio del ambiente radiativo de entornos urbanos compactos desde un punto de vista térmico, dejando fuera aspectos lumínicos y visuales. El parámetro de análisis será la temperatura de las superficies urbanas, partiendo de **tres hipótesis**:

- **Los estudios térmicos a nivel de calle aportan información sobre el clima de un entorno construido, útil para el proyecto urbano.**

Los estudios sobre las temperaturas de las superficies construidas se han centrado mayoritariamente en la escala de ciudad y de edificio. Los primeros proporcionan información térmica entre las escala de la geografía y del tejido urbano, pero las propuestas a este nivel son difícilmente implementables. Los segundos pueden ayudar a fundamentar intervenciones sobre el edificio, más realizables, al centrarse en la escala natural de trabajo del arquitecto. Sin embargo, su alcance espacial es tan limitado que difícilmente tienen repercusiones significativas sobre el clima de la ciudad. Esta tesis se plantea estudiar **una escala espacial intermedia: la calle**. La información térmica obtenida a nivel de calle puede ayudar a guiar intervenciones urbanas con una extensión suficiente para modificar el clima urbano pero con una escala aún próxima a la arquitectura.

- **La termografía puede ser una herramienta eficaz para el análisis térmico a nivel de calle, incluso contando con unos recursos limitados.**

Ante la falta de información sobre la ciudad existente y de herramientas de simulación adecuadas, la realización de trabajos experimentales en entornos reales puede contribuir a un mayor conocimiento del funcionamiento físico urbano. En esta tesis doctoral, se investigan las posibilidades de la termografía, técnica ya popular a la escala de edificio, como herramienta de análisis térmico a nivel de calle. Se explora qué se puede aprender sobre el funcionamiento térmico de un cañón urbano perteneciente a una trama compacta a través de la termografía contando con unos recursos limitados: **una cámara térmica comercial, una persona, un día**. Se parte de una idea de economía de medios técnicos y humanos, entendiendo que dichos recursos se podrían asimilar a los disponibles en la etapa de diagnóstico previa al proyecto urbano.

- **Una única termografía basta para proporcionar una visión representativa del ambiente térmico de una calle en un momento concreto.**

De manera recurrente, los estudios sobre las temperaturas superficiales a nivel de calle se basan en mediciones puntuales con termopares o termografías parciales del cañón (partes de edificios o del pavimento). En esta investigación, se plantea que una imagen térmica global de la calle, donde se visualicen las temperaturas de todas sus superficies en el mismo instante, resulta más eficaz para comprender el comportamiento térmico de un cañón. En el caso de tramas compactas, la necesidad de ver simultáneamente ambas fachadas de la calle conduce inevitablemente a la toma de termografías en **perspectiva**.

III. OBJETIVOS

La investigación doctoral propuesta busca ahondar en la comprensión de los fenómenos físicos y ambientales que tienen lugar en entornos construidos. Más específicamente, la tesis se enmarca en el estudio de la relación entre las características de un ambiente urbano y los intercambios radiativos que en él tienen lugar, centrándonos en el caso de geometrías urbanas ocluidas.

El **objetivo principal** de la tesis es analizar el **comportamiento térmico de las superficies de cañones urbanos pertenecientes a tramas compactas**. Concretamente, se pretende evaluar la distribución **espacial** y evolución **temporal** de las temperaturas superficiales a nivel de calle, como parámetro ambiental que expresa el resultado de su balance de energía.

Para la consecución de esta meta global, se plantean, a su vez, varios **objetivos secundarios**:

- Estudiar las **potencialidades y limitaciones de la termografía en perspectiva** como herramienta de análisis térmico global en entornos urbanos compactos.
- Diseñar y validar una metodología específica para la realización y análisis de **secuencias de termografías en perspectiva** a nivel de calle en tramas urbanas compactas.
- Evaluar la influencia de la **reflectividad** de las superficies urbanas sobre el ambiente térmico de la calle en este tipo de entornos.
- Evaluar los **efectos de la sombra a escala urbana** como modificador del ambiente térmico de la calle.

IV. METODOLOGÍA Y ESTRUCTURA DE LA TESIS

La validación de las hipótesis planteadas se basará, fundamentalmente, en el análisis de los datos obtenidos a partir de **trabajos experimentales**. Se realizarán campañas de medición en diferentes entornos que incluirán **termografías, fotografías** y el registro de diversos **parámetros ambientales**. Además, para ayudar a la interpretación de los resultados experimentales, se llevarán a cabo simulaciones de radiación en ondas cortas y cálculos de los factores de vista entre superficies construidas y con el cielo, como factor geométrico determinante para los intercambios radiativos.

La tesis comenzará con el desarrollo de **base teórica** de la investigación (Cap. 1 al Cap. 2.4) a partir de una revisión bibliográfica en torno a dos temas: la ciudad compacta y la termografía en ambiente urbano. Los trabajos analizados permitirán contextualizar el interés y los desafíos planteados por tema central de la tesis: la determinación de las temperaturas superficiales en calles compactas usando la termografía en perspectiva (Cap. 2.5). A continuación, se llevarán a cabo **tests preliminares *in situ*** y en laboratorio para valorar la aceptabilidad de los resultados de temperatura obtenidos a partir de perspectivas termográficas (Cap. 2.6). Posteriormente, se diseñará una **metodología** para el análisis de secuencias de termografías en perspectiva a nivel de calle (Cap. 3). Dicho método será aplicado en diversos **casos de estudio**, seleccionados para evaluar la influencia de la reflectividad (Cap. 4) y de la sombra urbana (Cap. 5) sobre el ambiente térmico de la calle en el caso de entornos urbanos compactos.



Figura 2. Metodología de investigación

INTRODUCCIÓN

En el **Capítulo 1** se expondrá el renovado interés por la ciudad compacta como alternativa al *Urban Sprawl*, dentro del debate sobre la sostenibilidad urbana, dando un especial énfasis a los aspectos energéticos. Y, finalmente se describirán los episodios de la historia urbana de Córdoba y Bayona que originaron las tramas compactas en las que se hallan las calles que se estudiarán en esta tesis.

En el **Capítulo 2**, se detallarán los principios físicos de la termografía. Se realizará una revisión bibliográfica sobre el empleo de dicha técnica en ambientes construidos, contextualizando el interés de los estudios termográficos a nivel de calle. A continuación, se mostrará que, en el contexto de la ciudad compacta, la termografía puede usarse en perspectiva para proporcionar una visión global del cañón. Como se mostrará al final del capítulo, este enfoque introduce, sin embargo, una serie de dificultades de interpretación. Basándose en varios tests experimentales, se discutirá la desviación de temperaturas debida al enfoque tangencial.

En el **Capítulo 3**, se presentará una metodología para la adquisición de información sobre las temperaturas superficiales y su posterior tratamiento, para la evaluación térmica de ambientes urbanos a nivel de calle. Como medio de validación, dicha metodología será aplicada en diversos casos de estudio, diferentes desde un punto de vista geométrico, material y climático, cuyos resultados se describirán en los siguientes capítulos.

En el **Capítulo 4**, el método será empleado para la evaluación térmica, desde una posición estática, de dos cañones urbanos representativos pertenecientes a dos cascos históricos preindustriales, uno en Córdoba y otro en Bayona. Dichos cañones fueron seleccionados por sus diferencias de reflectividad en fachada, lo que permitirá valorar la influencia de dicho parámetro sobre el ambiente térmico de la calle.

En el **Capítulo 5**, el método será utilizado para la evaluación de un área urbana más extensa, formada por varios cañones urbanos. Se analizará un recorrido a través de diversas escenas urbanas que, en conjunto, proporcionan una visión global del tejido en que se insertan. En este caso, el objeto de interés será el efecto del toldo urbano sobre la temperatura de las superficies, en función de la orientación de la calle y de la materialidad del toldo.

En el **Capítulo 6**, se presentarán las conclusiones parciales y generales del estudio y se expondrán posibles líneas futuras de investigación.

INTRODUCTION

I. WORK MOTIVATION

II. WORK HYPOTHESIS

III. AIMS OF THE WORK

IV. METHODOLOGY AND THESIS STRUCTURE

I. WORK MOTIVATION

From its beginnings, city design has been affected by climatic factors, which have influenced the building characteristics, the way they cluster in urban fabrics as well as their location within the territory. This historical consideration of climatic aspects in urban design is apparent, for example, from the differences among the vernacular architectures (Figure 1) and from the formal and material variety of historical cities of the worldwide. (Coch 1998; Serra Florensa 1999; Olgyay 1963; Higuera 2006).



Figure 1. Examples of vernacular strategies in architecture (Coch 1998)

During the past two centuries, there has been a growing interest in explaining, from a scientific point of view, the reciprocal influence between city and climate. Extensive research has been developed to prove that, not only the climatic considerations affect city design, but also city design modifies the regional climate, creating a particular set of climatic conditions within this urban environment. The first monographic on the subject of *urban climate* was published just 200 years ago by Luke Howard (1818), who demonstrated the existence of the *Urban Heat Island* effect by comparing the readings of thermometers located inside and outside of London. Since then, the number of studies on the issue has not ceased to grow (Landsberg 1981). Given that the climate of the city has direct effects on the quality of life and health of citizens, knowing its characteristics and the dynamics driving it is a crucial aspect for today's society (Moonen et al. 2012). This need becomes even more urgent if we consider that more than a half of the world's population live in cities nowadays and, the urban population is expected to reach the two thirds by 2050, which means more 6,500 million of people (United Nations 2014).

Over recent decades, thanks to the advances in data acquisition and processing techniques, it has been possible to demonstrate that cities are also able to influence the climate at a global scale. Scientific studies point out urban areas as the main driver of world climate change, and paradoxically, as structures especially sensitive to their effects (United Nations 2011). An important part of the greenhouse gas emissions causing global warming is directly derived from the energy consumed in buildings, largely used to achieve comfort within indoor building spaces (Burdett & Sudjic 2011). The amount of energy necessary to this end is in turn dependent on the outside environmental conditions, that is, the so-called *urban microclimate*.

INTRODUCTION

Three remarks may arise from this almost circular reflection on the climate-city relationship. First, city and climate are two realities that influence each other at several scales, with not always evident interactions. Second, the kind of climatic phenomena that can be analyzed is different depending on the study scale, as are the means required to do so. And third, climate is a changing reality, which can be actively influenced.

In this sense, **modifying the urban climate** by means of an adequate city design may represent a possible strategy to improve the people's quality of life and, at the same time, reduce the environmental consequences of their activities. Despite the demonstrated advantages of climate-conscious urban planning, the advances of urban climatology encounter, thought, difficulties to be incorporated to the project decision process due to a combination of factors interacting in a complex way (Erell 2008; Mills et al. 2010; Grimmond et al. 2010).

On one hand, despite decades of research on *Urban Physics*, our knowledge about the energy processes driving the urban climate is still too limited to provide undebatable project arguments (Beckers 2016). This situation particularly concerns **the radiative exchanges and, especially, the ones occurring within densely built environments**, where interactions between short and longwave fluxes are still not well understood (Ghandehari et al. 2018).

On the other hand, there is a contradiction between the typical scale of urban climate studies (city / urban fabric) and the one where the architectural project actually becomes real (building element / whole building). In response to this situation, an attractive approach could be **focusing on the street level**, an intermediate scale where the fields of interest of both disciplines converge.

Additionally, there are difficulties to "urbanize" conventional meteorological data (Mills et al. 2010), that is, there is **a lack of experimental data in real environments** showing the relationship between the city characteristics and its microclimate. This lack is especially noticeable at the street level, where data collection is especially complex.

Based on the three previous issues, the general framework of this thesis is defined: **the study of the radiative exchanges taking place within streets of compact fabrics**. The radiative budget of street surfaces represents a key factor of the urban climate with significant impacts on:

- **Pedestrians:**

Pedestrian thermal comfort depends on the energy exchange between the human body and its surroundings. In this balance, short and longwave radiative fluxes can play a key role. (Fanger 1972; Serra & Coch 2009). In complex urban environments, both fluxes experience notable spatiotemporal variations, being, therefore, a complex parameter to evaluate. Difficulties are especially significant when it comes to assessing longwave fluxes, which can be decisive in occluded urban environments, especially under summer conditions (Ali-Toudert & Mayer 2006; Kántor & Unger 2011).

- ***The energy behavior of buildings:***

The behavior of the indoor environment of buildings, and consequently, their energy demand, is strongly linked to the energy fluxes through their façades, where the radiation budget have shown to play a main role (Bouyer et al. 2011). The relationship between radiation and building energy behavior has been intensively addressed, mainly focusing on the influence of solar radiation on the energy requirements for air conditioning and lighting (eg. Strømman-Andersen & Sattrup 2011). On the contrary, effect of longwave fluxes on the building behavior have received much less attention, especially in compact urban environments (Evins et al. 2014).

- ***The city:***

Radiative aspects have direct and indirect effects on the energy behavior of urban tissues and, by extension, on that of the **city as a whole**. On one hand, the energy demand of a particular fabric directly depends on the sum of the energy requirements of its individual buildings, strongly dependent on the magnitude and distribution of radiative fluxes. On the other, energy interactions within the canyon have indirect effects on the energetic behavior of the tissues that in turn, affect the climate on an urban scale. A well-known of these effects is the Urban Heat Island, a phenomenon whose intensity increases in highly occluded urban geometries as a result of a higher radiative trapping and less longwave cooling potential towards the sky (Oke 1987).

In short, radiation studies at street scale have focused on shortwaves from the point of view of both comfort and energy consumption (Harman 2004). The lower attention received by longwave exchanges partially explains the limited consideration of thermal aspects in the urban project and justifies the interest of a global analysis of surface temperatures within the canyon. One of the causes of the shortwave analysis dominance is the difference in the availability of tools to visualize and quantify each phenomenon. Regarding solar radiation, study means are varied and affordable: physical models, photographs of real environments and simulations on virtual models. On the contrary, tools for assessing the "invisible" part of the radiation (longwave) are much more limited. On one hand, there is no possibility of making physical mock-ups, since thermal properties of materials are difficult to scale.

On the other hand, unlike regarding visible light, current simulation tools are scarce, not very interactive and usually require very long computation times (Gros et al., 2011). Within this context, **the potential of thermography** is highlighted as a technique for thermal analysis in already-built environments.

INTRODUCTION

The main advantage of thermography compared to direct temperature measurement techniques is that this one provides **spatialized information**. Additionally, the thermal data can be enriched by carrying out thermographic sequences, which also allow analyzing the **time dimension** of the phenomena. The possibility of studying urban surfaces temperature in time and space opens the door to a better understanding of the thermal processes that occur in the built environment, as a necessary starting point for the urban project.

An added advantage of infrared measurement techniques is that, thanks to the technological advances of recent decades, **thermal cameras have become accessible devices** at a relatively low cost. However, as Vollmer & Möllmann (2010) point out, this fact has led to the paradox that: "*there are probably more cameras sold worldwide than there are people who understand the physics behind and who know how to interpret the nice and colorful images of the false color displays*".

Indeed, infrared cameras are able to produce thermal images almost instantaneously but, unfortunately, **their interpretation may be a complicated** task in many occasions, even for technicians with knowledge of infrared physics and extensive experience in the camera use.

Taken together the interpretation issues of thermography and the inherent complexity of the city, the study of urban thermography becomes a research area of great potential and, at the same time, which poses significant challenges.

II. WORK HYPOTHESIS

This thesis focuses on the study of the radiative conditions of compact urban environments from a thermal point of view, leaving out the light and visual aspects of radiation. The analysis parameter is the temperature of urban surfaces, based on three hypotheses:

- **Thermal studies at street level provide information on the climate of a built environment useful for the urban project.**

Studies on built surfaces temperatures have mostly focused on the city and building scale. The former ones provide thermal information between the geographic and urban fabric scales, but proposals at this level are difficult to implement. The latter ones help to justify interventions over the building, more feasible since they focus the architect's natural scale of work. However, their spatial extent is so limited that they hardly have a significant impact on the city climate. This thesis proposes to **assess an intermediate spatial scale: the street**. The thermal information obtained at the street level may help to design urban interventions with an extension big enough to modify the urban climate but with a scale still close to the architecture.

- **Thermography can be an effective tool for thermal analysis at street level, even with limited resources.**

In the absence of information on the existing city and appropriate simulation tools, carrying out experimental works in real environments contribute to a greater knowledge of urban physical functioning. This doctoral research deals with the possibilities of thermography, an already-popular technique at the building scale, as a tool for thermal analysis at the street level. It explores what can be learned about the thermal performance of a canyon belonging to a compact urban fabric by means of thermography having limited resources: **one person with a commercial thermal camera for a day**. These conditions could be assimilated to the means available for the pre-diagnosis stage of urban projects.

- **One single thermography suffices to provide a representative view of the thermal environment of a street at a specific time.**

The most common surface thermal studies at street level are based on point temperature measurements by using thermocouples or partial thermographs of the canyon (parts of buildings or pavement). This thesis poses that a global thermal image, where temperatures values of all surfaces are depicted at the same moment, may be more effective for understanding the thermal behavior of a canyon. In the case of compact tissues, the need to simultaneously visualize both facades of the street inevitably leads to the shoot of perspective thermographs.

INTRODUCTION

III. AIMS OF THE WORK

The proposed doctoral research seeks to deepen the understanding of physical and environmental phenomena that take place in built environments. More specifically, the thesis is framed in the study of the relationship between the characteristics of an urban environment and the radiative exchanges that take place in it, focusing on the case of occluded urban geometries.

The main objective of the thesis is to analyze the thermal behavior of urban canyon surfaces belonging to compact tissues. In particular, this research aims to assess the **spatial distribution** and **temporal evolution** of surface temperatures at street level, as a physical result of the energy balance that takes place on them within this kind of urban geometries.

In order to achieve this global goal, the following **secondary objectives** are defined:

- Study the **potentialities and limitations of the use of perspective thermography** as a global thermal analysis tool in compact urban environments.
- Design and validate **a specific methodology** for carrying out of sequences of perspective thermographs at street level in compact urban tissues.
- Assess the influence of the **reflectivity** of urban surfaces on the thermal environment of the street within occluded built geometries.
- Assess the effects of **shading on an urban scale** as a modifier of the street's thermal environment.

IV. METHODOLOGY AND THESIS STRUCTURE

The validation of the hypotheses will be mainly based on the analysis of the data obtained through **experimental works**. Several measurement campaigns will be conducted in different environments comprising **thermographs, photographs** and the recording of various **environmental parameters**. In order to help interpret the experimental data, shortwave radiation simulations and view factors between the built surfaces and the sky will be carried out, as determining factors in radiative exchanges.

The thesis will start with the development of the **theoretical research framework** (Chapter 1 to Chapter 2.4) based on a literature review on two topics: the compact city and the use of thermography in urban environment. The analyzed works will allow contextualizing the interest and the challenges posed by the central subject of the thesis: the determination of surface temperatures in compact streets using perspective thermography (Chapter 2.5). Next, **pre-eliminary tests** will be carried out, both in situ and in the laboratory, to assess the acceptability of the temperature results obtained by means of thermographic perspectives (Chapter 2.6). After, a **methodology** will be designed for the analysis of sequences of thermographs in perspective at street level (Chapter 3). This method will be implemented in several **case studies**, selected to evaluate the influence of reflectivity (Chapter 4) and the urban shadow (Chapter 5) on the street thermal environment in the case of compact urban geometries.

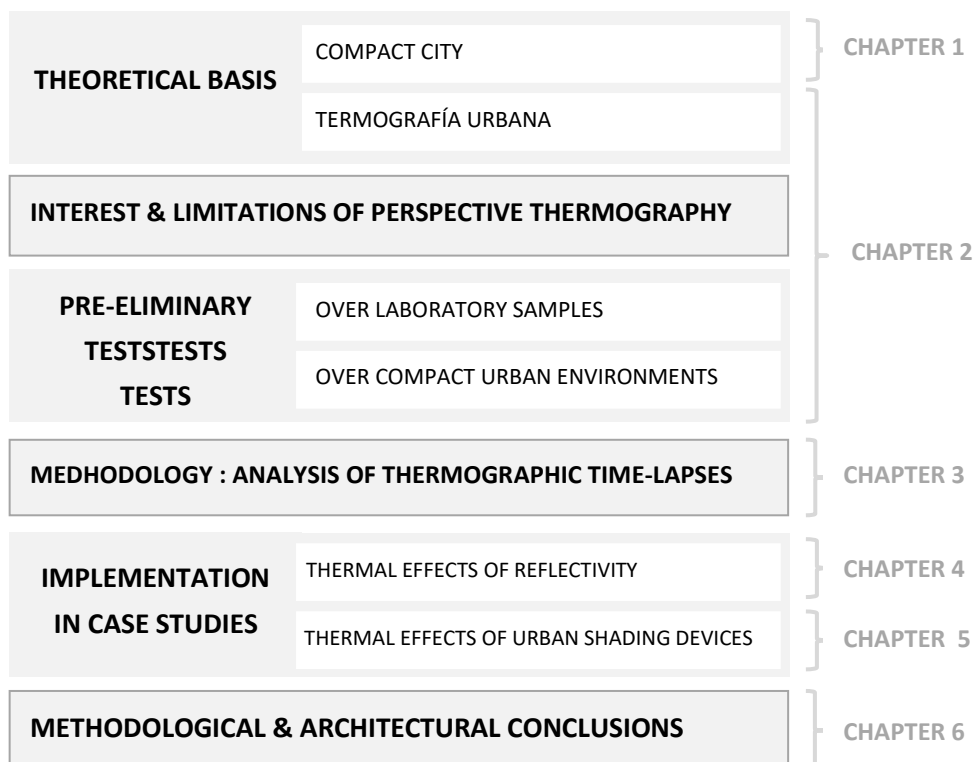


Figure 2. Research methodology

INTRODUCTION

In **Chapter 1** the renewed interest in the compact city will be exposed, as an alternative to the Urban Sprawl within the debate on urban sustainability, giving special emphasis to the energy aspects. And, finally, some episodes of the urban history of Córdoba and Bayonne will be described. The focus will be on the ones that originated the compact tissues where the streets analyzed in this thesis are located.

In **Chapter 2**, the physical fundamentals of thermography will be detailed. A literature review on the use of this technique in built environments will be developed, contextualizing the interest of thermographic studies at street level. Next, it will be shown that, in the context of the compact city, thermography can be used in perspective to provide a global view of the canyon. As will be discussed at the end of the chapter, this approach introduces, though, a series of interpretation difficulties. Based on several experimental tests, the deviation in temperatures when using perspective thermography is discussed.

In **Chapter 3**, a methodology for the thermal evaluation of urban environments at street level will be presented, including the surface thermal data acquisition and post-processing. To validate this procedure, this methodology will be applied in various cases of study, differing from a geometric, material and climatic point of view. Results will be described in the following chapters.

In **Chapter 4**, the method will be used for the thermal assessment of two representative urban canyons belonging to two pre-industrial historic centers, one in Cordoba and the other in Bayonne, from a static position. These streets were selected based on their differences in their façade reflectivity, which will allow assessing the influence of this parameter on the street thermal environment.

In **Chapter 5**, the method will be used for the evaluation of a larger urban area, comprising several streets. Several urban scenes joined by a path will be analyzed to provide a global thermal view of the fabric they belong to. In this case, the object of interest will be the effect of the urban canopy shadings on the surface temperature, depending on the orientation of the street and the materiality of the device.

In **Chapter 6**, the partial and general conclusions of the study, as well as possible future research lines, will be presented.

CIUDAD COMPACTA, SOSTENIBILIDAD Y ENERGÍA

- 1.1 INTRODUCCIÓN
- 1.2 LA CIUDAD COMPACTA COMO ALTERNATIVA AL URBAN SPRAWL
- 1.3 LA DEFINICIÓN DE LA CIUDAD COMPACTA
- 1.4 COMPORTAMIENTO ENERGÉTICO DE LA CIUDAD COMPACTA
- 1.5 TRAMAS COMPACTAS: RESILIENCIA Y ACTUALIDAD
- 1.6 ORIGEN E INTERÉS DE LAS TRAMAS COMPACTAS ESTUDIADAS
- 1.7 CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO

1.1 INTRODUCCIÓN

Según las perspectivas demográficas, la población mundial crecerá y será cada vez más urbana (UN-Habitat 2011). Este hecho, unido a la actual crisis ambiental, justifica la necesidad de reflexionar sobre cómo ha de construirse la ciudad del futuro, reactualizando el debate entre defensores de la ciudad compacta frente al modelo de ciudad difusa, comenzado hace ahora más de un siglo (Epígrafes 1.2, 1.3 y 1.4).

Desde el punto de vista de la energía, la sostenibilidad de la ciudad compacta también está en discusión. Este hecho es una muestra más de las actuales limitaciones para comprender cómo funcionan los intercambios de energía en ambientes urbanos y, particularmente en morfologías ocluidas (Epígrafe 1.5). Como ejemplo de este tipo de entornos, se seleccionaron los cascos históricos de Córdoba y Bayona, cuyo origen e interés serán descritos en el Epígrafe 1.6.



Figura 1. 1. *Urban sprawl* en la ciudad de Londres frente a la ciudad compacta de Nueva York

(Fuentes: <https://www.dailymail.co.uk/news/article-2085752/Eye-sky-The-pretty-patterns-housing-developments-world.html> y <http://www.top10listland.com/wp-content/uploads/2014/01/new-york-city.jpg>).

1.2 LA CIUDAD COMPACTA COMO ALTERNATIVA AL URBAN SPRAWL

Los inconvenientes de la ciudad industrial del siglo XIX generaron un repertorio de propuestas urbanas de diferente calado, que van desde las utopías a escala de ciudad, a soluciones de corte más local y pragmático, como tipologías edificatorias. A finales del siglo XIX y durante las primeras décadas del siglo XX, el debate sobre la forma de la ciudad se intensifica y se estructura en torno a dos grandes posturas: los defensores de modelos centralizados y los partidarios de modelos descentralizados, representados en su extremo por la *Ville Radieuse* de Le Corbusier y *Broadacre City* de Frank Lloyd Wright, respectivamente (Figura 1. 2).

Durante las primeras décadas del siglo XX, la irrupción del *zoning* en las normativas urbanísticas, una industria del automóvil en expansión, el fomento de las infraestructuras por carretera en detrimento del transporte público y una política económica de hipotecas “baratas”, crearon el caldo de cultivo ideal para una expansión urbana de tipo disperso en EEUU. Las primeras voces en contra de este tipo de desarrollo surgieron en este país en los años 20, aunque habría que esperar hasta finales de los 50 y principios de los 60 para que el fenómeno del *Urban Sprawl* fuese denominado como tal (Burchell et al. 1998). Durante esta década, proliferaron los estudios señalando los aspectos negativos de este modelo de crecimiento, entre los que destaca el trabajo de Jane Jacobs, con su libro *The Death and Life of Great American Cities* de 1961. Tomando Nueva York como ejemplo, Jane Jacobs desarrolla un alegato en contra de los principios del Urbanismo Racionalista Moderno, como generador de asentamientos “antiurbanos”, y en favor de la alta densidad, como motor de la diversidad, cualidad necesaria para la riqueza de vida urbana (Jacobs 1993). Jane Jacobs enuncia las características del modelo de *Compact City*, como alternativa a los males generados por el *Urban Sprawl*, sentando así las bases para el posterior desarrollo de diversos movimientos urbanos ambientalistas (*New Urbanism* en los años 80, *Green Urbanism* en los años 90 y *Ecological Urbanism* en los años 2000). A pesar de su carácter referencial, el enfoque de esta obra presenta dos limitaciones que, en realidad, son generalizables al debate sobre la forma urbana de las siguientes décadas.

La primera de ellas tiene que ver con **la escala de análisis y de propuesta**. Su estudio, centrado en la escala del vecindario, encontró dificultades para traducirse en un modelo global de ciudad, siendo incapaz de aportar soluciones lo suficientemente potentes como para revertir las tendencias de descentralización imperantes (Fishman 1977; Breheny 1996). Esta negación de la planificación a gran escala, tendencia general a partir de los años 60, encuentra su origen último en las múltiples crisis que afectaron a las ciudades y sus áreas metropolitanas en los años 60 y 70 (ej. fracaso de las *Villes Nouvelles* francesas, inspiradas por el Movimiento Moderno de corte centralizador, Figura 1. 3). A partir de este momento, la ciudadanía, sus representantes políticos y los mismos planificadores pierden confianza en la eficacia de las grandes ideas visionarias del urbanismo clásico (Berke 2002; Fishman 1977; Breheny 1996) y la planificación urbana da un giro hacia enfoques pragmáticos. Este hecho se evidencia en el predominio de un urbanismo basado en la planificación de infraestructuras de carretera, la evaluación de los riesgos ambientales y de los modelos de transporte, aspectos importantes para el funcionamiento urbano, pero incapaces de generar respuestas a escala de ciudad (Berke 2002).

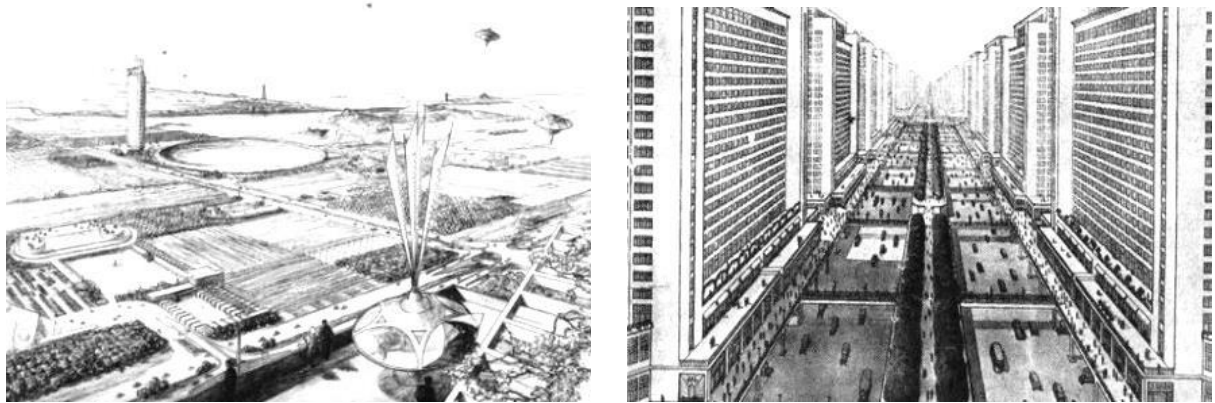


Figura 1. 2. Broadacre City de Wright (izquierda) y la Ville Radieuse de Le Corbusier (derecha). (Fuente: <https://histaq.wordpress.com/2012/10/09/aula-15-ville-radieuse-vs-broadacres-1929-1932-urbanismo/>)

La segunda limitación, estrechamente relacionada con la primera, es la dificultad para **definir y cuantificar la ciudad compacta, y cómo sus características pueden resultar ventajosas con respecto al modelo difuso**. Un trabajo pionero en esta dirección fue el informe “*The Cost of the urban Sprawl*”, desarrollado por la *Real Estate Research Corporation* en EEUU (1974). Este documento fue el primero en abordar, exhaustivamente y desde una perspectiva científica, la relación entre densidad, patrones de crecimiento y costos del desarrollo urbano (en términos de consumo de tierra, construcción de vivienda e infraestructuras/equipamientos asociados, costes energético-ambientales y calidad de vida personal). En él, se comparaban los costos de 6 comunidades teóricas de 10.000 viviendas, con una densidad variable entre 4 y 20 viviendas por acre (\approx entre 10 y 50 viviendas/ha, baja densidad, en cualquier caso). El estudio demuestra la ineficiencia de los patrones suburbanos de desarrollo disperso, y que un aumento de la densidad favorecería un ahorro de costes públicos y privados. Aunque no exenta de críticas (metodológicas fundamentalmente, como en Windsor 1979; Gordon & Wong 1985), esta obra constituye una referencia fundamental para los defensores de la tesis de la ciudad compacta, y sus conclusiones generales son compartidas por numerosos expertos en la materia. Una prueba de su vigencia sería la publicación de una actualización del documento que incluye una exhaustiva revisión bibliográfica del estado de la discusión (Burchell et al. 1998).

A partir de los años 70, las diversas crisis energéticas y la expansión descontrolada de las ciudades a escala mundial hicieron que el debate urbano pusiera el acento sobre aspectos ambientales y reviviese la consciencia sobre la necesidad de una planificación a gran escala. El gran reto que para los urbanistas de la transición del siglo XIX al XX fue la ciudad industrial, para los urbanistas del siglo XX al XXI será el imperativo de *un desarrollo urbano sostenible*, entendido como aquel que satisface las necesidades del presente sin comprometer las necesidades de las futuras generaciones, como se expresa en el Informe Brundtland (United Nations Commission 1987). Dentro de este contexto, la ciudad dispersa se percibe como un modelo devorador de recursos (sobre todo en términos de energía destinada al transporte y de consumo de suelo) y la *ciudad compacta* será planteada como la gran respuesta (Breheny 1996).

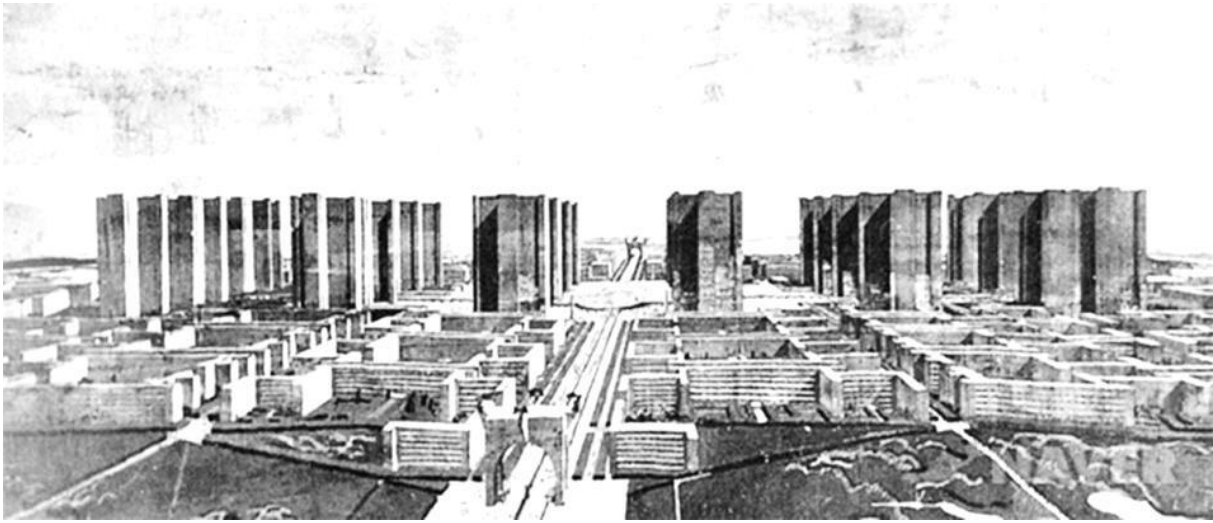


Figura 1. 3. *Ville contemporaine de trois millions d'habitants* (LeCorbusier, 1922) frente a la *Ville Nouvelle à Sarcelles*, en 1961 (Fuente : <http://geographica.net/2015/10/trop-grands-les-ensembles-de-la-banlieue/>)

1.3 DEFINICIÓN DE LA CIUDAD COMPACTA

La obtención de datos empíricos que permitan avanzar en el debate sobre la sostenibilidad de la ciudad compacta se ve obstaculizada por dos razones: la falta de consenso sobre su significado y la ausencia de indicadores reconocidos para medirla (Burton 2002).

Efectivamente, a pesar de tratarse de uno de los términos clave de la discusión urbana del último siglo, no existe una definición clara e inequívoca de ciudad compacta. Ésta suele describirse mediante una enumeración - más o menos extensa- de sus características y, a menudo, por oposición a las de la ciudad dispersa (Tabla 1. 1). Así, *ciudad compacta* sería aquella que tiene altas densidades, mezcla de usos y unos límites urbanos definidos, mientras que la *ciudad dispersa* se caracterizaría por su baja densidad, una segregación espacial de usos y una ocupación discontinua del territorio. La limitación de este enfoque radica en que la multiplicidad de características asociadas a cada modelo puede llevar a conclusiones enfrentadas sobre la compacidad de un tejido.

<i>Modelo de ciudad compacta</i>	VS	<i>Modelo de ciudad dispersa</i>
<ol style="list-style-type: none"> 1. Altas densidades residenciales y de empleo. 2. Mezcla de usos del suelo. 3. Grano fino de usos del suelo (proximidad de usos variados y tamaño relativo pequeño de parcelas). 4. Intensas interacciones sociales y económicas. 5. Desarrollo contiguo (algunas parcelas o estructuras pueden estar vacantes o abandonadas). 6. Desarrollo urbano contenido, demarcado por límites legibles. 7. Presencia de infraestructuras urbanas, especialmente alcantarillado y tuberías principales de agua. 8. Posibilidad de transporte multimodal. 9. Alto grado de accesibilidad: local / regional 10. Altos grados de conectividad entre calles (interna / externa), incluidas aceras y carriles para bicicletas 11. Alto grado de cobertura superficial impermeable. 12. Baja proporción de espacios abiertos. 13. Control unitario de la planificación del territorio o control estrechamente coordinado. 14. Capacidad fiscal pública suficiente para financiar instalaciones e infraestructuras urbana. 		<ol style="list-style-type: none"> 1. Baja densidad residencial. 2. Extensión ilimitada de los nuevos desarrollos urbanos. 3. Segregación espacial de los diferentes tipos de usos del suelo: zonificación. 4. Desarrollo espacialmente discontinuo o en mancha de aceite. 5. Sin propiedad centralizada del suelo ni planificación unitaria el territorio. 6. Transporte dominado por vehículos motorizados de propiedad privada. 7. Fragmentación de la autoridad de gobernanza de los usos de la tierra entre muchos gobiernos locales. 8. Grandes variaciones en la capacidad fiscal de los gobiernos locales. 9. Desarrollo de una banda comercial a lo largo de las carreteras principales. 10. Mayor dependencia para proporcionar vivienda a personas de bajos ingresos.

Tabla 1. 1. Comparación de características de los modelos de ciudad compacta y dispersa (Neuman 2005)

Imaginemos, por ejemplo, un tejido formado por torres residenciales aisladas, habitual en los polígonos de vivienda de los años 60 en España. Si bien su densidad edificada y poblacional puede ser elevada, la diversidad de usos es limitada. Comparémoslo ahora con un casco histórico medieval de una ciudad turística, menos densamente poblado, pero mucho más variado en cuanto a usos del suelo, conviviendo residencia con terciario y oficinas. En ese caso, ¿qué tejido de los dos es más compacto? ¿lo son los dos?

Una estrategia recurrente para tratar de poner fin a esta dialéctica – reduciendo, eso sí, la riqueza del debate (Neuman 2005) - ha sido emplear indicadores numéricos objetivos para evaluar el grado de compacidad del tejido. Sin embargo, este enfoque constituye nuevamente un punto sobre el que aún no se ha alcanzado el consenso, dificultando sobremanera la comparación entre distintas fuentes y, por tanto, la exportabilidad de las conclusiones.

En este sentido, uno de los indicadores más utilizados - a veces, el único - es el de la **densidad**. Este parámetro se define como el ratio entre el número de unidades de un determinado elemento o magnitud y el ámbito espacial de referencia donde se ubica (Batty 2009). Tras la aparente simplicidad de esta definición, subyace una gran complejidad, ya que, en función de cómo se definan numerador y denominador, existirán numerosos tipos de densidad (Batty 2009; Boyko & Cooper 2011; Churchman 1999). Según el elemento de análisis (numerador), distinguiremos tres categorías de densidad física urbana (de edificación, de población y de viviendas) que pueden concretarse en decenas de indicadores específicos (hasta 23, según Alexander 1993). La delimitación del ámbito de referencia (denominador) constituye otro aspecto problemático, ya que los resultados obtenidos dependerán en gran medida de cómo se lleve a cabo. Un claro ejemplo a este respecto es la diferencia entre los valores netos y brutos de densidad (Batty 2009).

En relación a la discusión sobre la forma urbana, es importante recalcar que los indicadores de densidad describen la concentración o intensidad de un determinado elemento dentro de una superficie o volumen de referencia, pero no expresan cómo éstos se distribuyen dentro de la misma. Son, por tanto, parámetros cuantitativos y objetivos, pero con una capacidad limitada de representar la geometría urbana. Así pues, densidades idénticas pueden concretarse formalmente en realidades construidas muy diferentes. Pont & Haupt (2010) propusieron un enfoque interesante para superar esta limitación, consistente en correlacionar varios indicadores de densidad como medio para caracterizar formalmente tejidos urbanos (Figura 1. 4).

Otros autores han intentado encontrar indicadores propios para medir la **compacidad** que, además de reflejar la concentración de los elementos, proporcionen información sobre su organización espacial dentro de un determinado territorio. En este sentido, destacaremos el trabajo de Tsai (2005), donde se estudia la capacidad de diversos parámetros estadísticos para describir el grado de agrupación de los elementos dentro del área de referencia (*clustering*). Este estudio concluye que, entre los indicadores estudiados, el *índice de Moran* es el más apropiado, de tal manera que, a mayor compacidad del tejido, mayor será su valor (más cercano a +1).

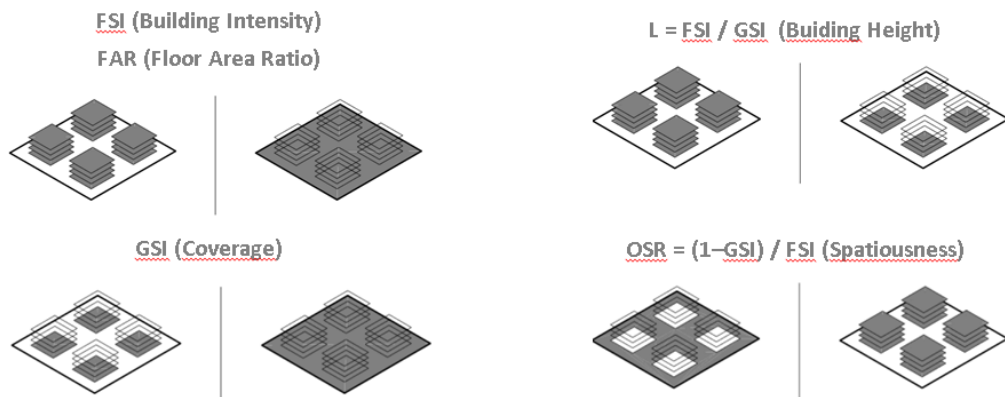


Figura 1. 4. Cuatro indicadores de densidad correlacionados por Pont & Haupt (2010) para caracterizar un tejido urbano.

Por el contrario, los desarrollos discontinuos en “mancha de aceite”, se asociarán con los índices de Moran más bajos (más cercanos a -1). Este índice es capaz de proporcionar además información sobre si la dispersión de los elementos construidos dentro del tejido se produce de forma monocéntrica, policéntrica o descentralizada, representándose respectivamente por índices de Moran altos (+1), medios (+0.5) y cercanos a 0 (Figura 1. 5).

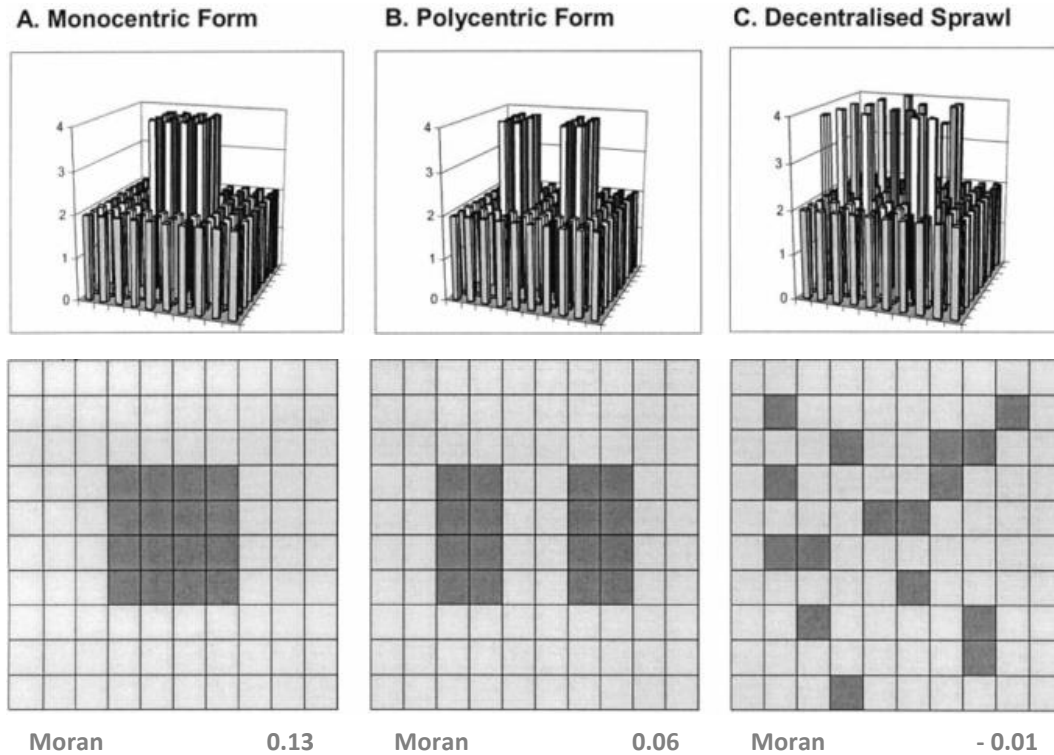


Figura 1. 5. Ejemplo abstracto de formas monocéntricas, policéntricas y descentralizadas del Urban Sprawl (Tsai 2005)

En los párrafos anteriores, se ha proporcionado un breve resumen de los enfoques para definir la ciudad compacta a través de indicadores cuantitativos, y de su capacidad para representar una realidad física urbana determinada. A pesar de su uso recurrente, tanto en la literatura científica como en la planificación urbana, es necesario tener en cuenta varios aspectos a la hora de interpretar los resultados.

Por un lado, la escala de análisis. La forma urbana puede ser analizada desde escalas geográficas que van desde el área metropolitana, a la ciudad o el barrio. Para cuantificar el grado de compactidad, en muchas ocasiones se utiliza el mismo parámetro de análisis para distintas escalas espaciales, lo que a veces puede arrojar resultados contradictorios o de difícil interpretación. La

Figura 1. 6 intenta ilustrar esta problemática a partir del ejemplo de la ciudad de Bayona. En la imagen de la izquierda, los valores obtenidos en los indicadores numéricos “hablarán” de un tejido urbano de alta densidad; mientras que en las otras dos imágenes, a una escala mayor (donde el área de referencia incluye el río, espacios verdes y zonas de viviendas unifamiliares con jardín), los valores serán notablemente inferiores. De hecho, analizando la última imagen, la ciudad se encuadraría dentro de los desarrollos urbanos de baja densidad.

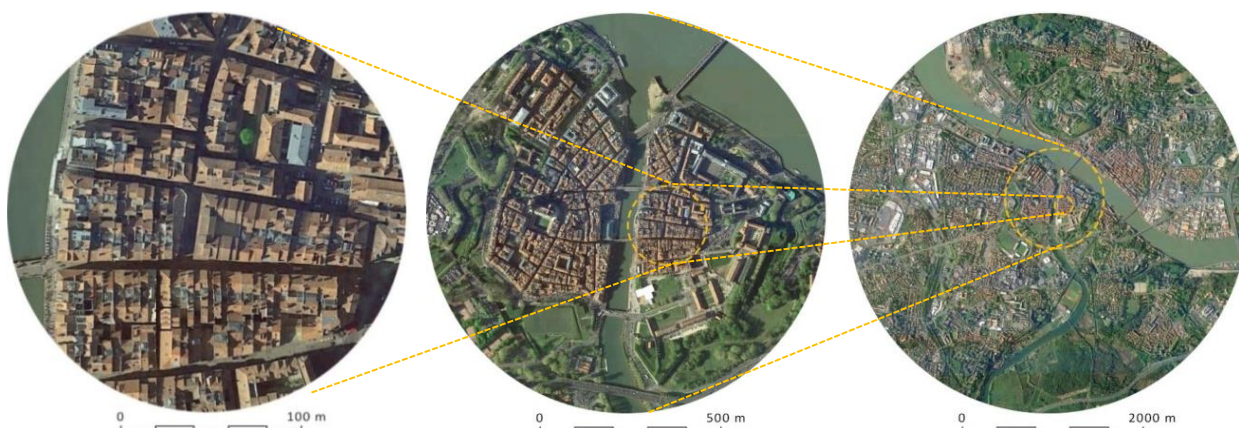


Figura 1. 6. Reflexión sobre la densidad del centro histórico de la ciudad de Bayona a diferentes escalas.

Por otro lado, la pérdida de información cualitativa sobre el tejido analizado. A pesar de las ventajas de trabajar con indicadores numéricos, éstos difícilmente representarán una imagen tan clara de la ciudad como un plano. Una de las complicaciones clásicas en este sentido es el hecho de que dos formas urbanas muy diferentes puedan correlacionarse con valores idénticos de un indicador. A este respecto, Tsai (2005) señala que el coeficiente de Moran - a pesar de ser sensible en cierta forma a la distribución espacial de los elementos -, cuando toma un valor bajo, puede estar representando bien un desarrollo discontinuo o bien un *Sprawl* descentralizado.

1.4 TRAMAS COMPACTAS: RESILIENCIA Y ACTUALIDAD

A pesar de presentar una mayor difusión en los países anglosajones, el *Urban Sprawl* constituye, a día de hoy, un fenómeno global. Este modo de hacer ciudad y de entender la vida urbana ha calado en el imaginario colectivo, llegando incluso a arraigar en áreas con una herencia urbana tradicionalmente compacta. Este sería el caso de Europa, donde la dispersión urbana ha crecido rápidamente desde los años 70, independientemente del tamaño de la ciudad y de su morfología preexistente, como evidencia el hecho de que las áreas urbanizadas aumentan a un mayor ritmo que la población, que se mantiene estable o en ligero crecimiento. En los últimos 30 años, diversos estudios centrados en las zonas más meridionales de Europa y el área Mediterránea han demostrado el arraigo de este fenómeno en ciudades como Roma, Barcelona o Atenas (Figura 1.7), donde la ciudad compacta había sido la norma hasta tiempos recientes (Tombolini et al. 2015).

Este cambio de tendencia en los modos urbanización ha despertado la preocupación de urbanistas y poderes públicos, motivando la aparición de informes sobre las tendencias de descentralización urbana, ahora también, en el viejo continente. Como ejemplo, citaremos el *Urban Sprawl in Europe* (European Environmental Agency 2016), donde se remarca la urgente necesidad de actuar contra la dispersión urbana, reflejando la preocupación existente a nivel institucional por el incremento de la urbanización dispersa en el contexto europeo.

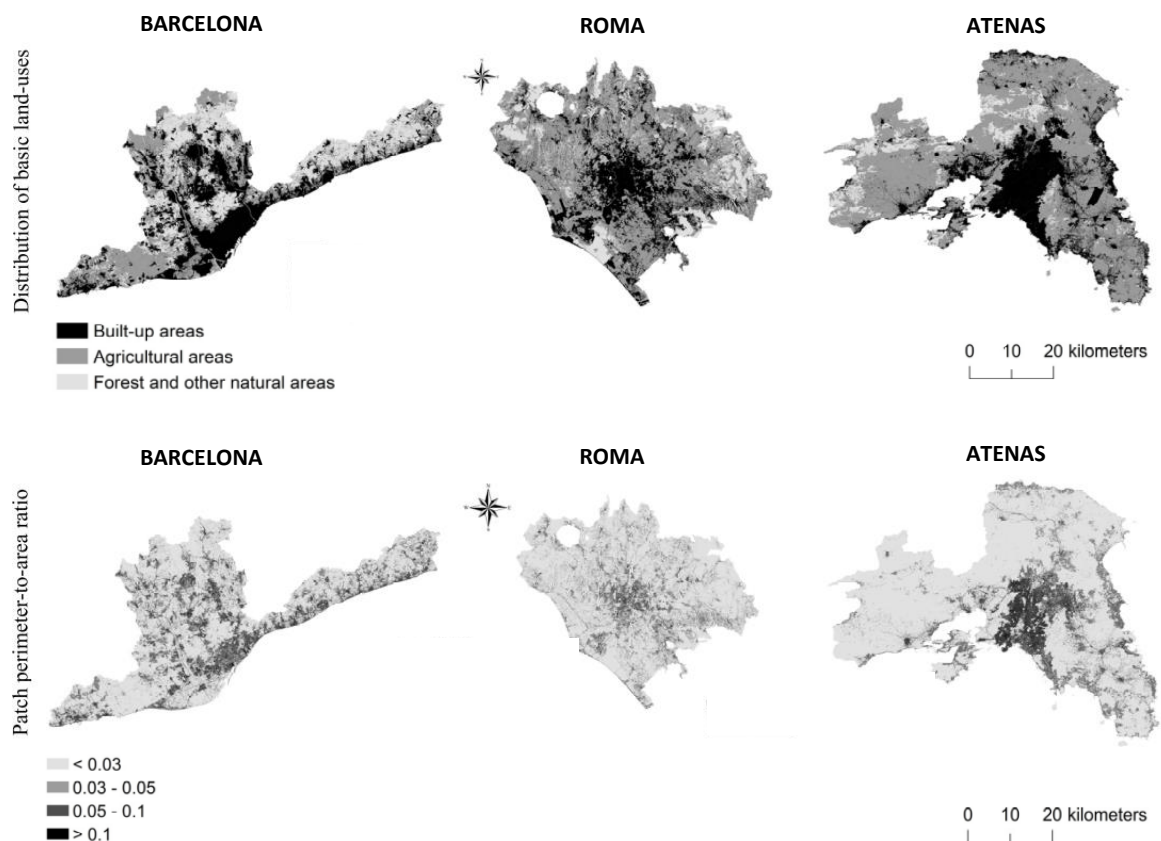


Figura 1. 7. Mapas de usos del suelo en Barcelona, Roma y Atenas (Tombolini et al. 2015)

Aunque la sostenibilidad del modelo compacto es aún objeto de debate, hay un argumento de peso a su favor sobre el que los expertos parecen estar de acuerdo: su menor consumo de tierra en comparación con modelos dispersos, que fragmentan más el territorio, disminuyendo su valor ecológico. Apoyándose en esta idea, y considerando el suelo como recurso a gestionar, los gobiernos actuales están apostando oficialmente por el modelo compacto. Ejemplos explícitos de ello pueden encontrarse, por ejemplo, en la conferencia de la ONU sobre Desarrollo Sostenible Rio+20 (2012) o en el 7º Programa de Acción Ambiental Europeo '*Living well, within the limits of our planet*'.

La comunidad internacional manifiesta así su apoyo en el siglo XXI, a los postulados que movimientos urbanos defendían desde finales del s. XX, como el *Green Urbanism* surgido en los años 90. En ellos, la ciudad europea es vista no sólo como ejemplo idealizado de ciudad compacta tradicional, sino un laboratorio donde se están poniendo en práctica estrategias concretas de contención urbana, intensificación de usos y reconversión de tejidos. Estos movimientos no proponen la vuelta a la ciudad compacta pre-moderna, sino una mayor intensidad de uso de los tejidos, lo que implica renunciar a muchos aspectos de la urbanística del siglo XX y formular nuevas propuestas adaptando los modelos compactos anteriores a las necesidades metropolitanas actuales (Beatley 2000).

La tradición en Europa de urbanizar de forma concentrada se debe a diversas causas: herencia urbana de sistemas viarios y de parcelación; existencia de murallas defensivas que marcaban un claro límite para la extensión urbana; la escasez relativa de tierras en ciertas áreas para acomodar a una población creciente (ej. Los Países Bajos); la necesidad de contención para conservar las tierras agrícolas de valor cercanas a la ciudad; incluso, en ocasiones, condicionantes climáticas. Sin embargo, a lo largo de la historia, y dramáticamente a partir de la Revolución Industrial, algunos de estos condicionantes, que llevaron a las ciudades a constituirse como estructuras formalmente compactas, han ido perdiendo fuerza. Las murallas devinieron inservibles tras los cambios en las tecnologías bélicas. Las limitaciones de transporte de personas, mercancías e información se han desvanecido, al desarrollándose espectacularmente el transporte privado y los nuevos medios de comunicación. Los alimentos consumidos por la urbe son proporcionados por un mercado agrícola global... Ante esta situación, el urbanismo ha respondido creando tejidos poco densos demográficamente y edificatoriamente, pero muy densamente equipados de infraestructuras de transporte.

La coyuntura actual podría hacer pensar que los tejidos compactos existentes están abocados al abandono y al colapso. Sin embargo, este tipo de tejidos, lejos de abandonarse, siguen siendo habitados, mostrando, en muchas ocasiones, una mayor capacidad de resiliencia que los tejidos más descentralizados. Las tramas dispersas, por su carácter menos cohesivo, parecen colapsar con mayor facilidad, pero el daño sobre el ecosistema natural está hecho. Uno de los factores que disminuyen la *resiliencia urbana* de las tramas dispersas es su dependencia casi exclusiva del transporte privado, ya que frena la capacidad de adaptación de la ciudad a los cambios futuros (Newman et al. 2009). A modo ilustrativo a este respecto, mostraremos el ejemplo de un barrio de Detroit, antiguo icono de la industria automovilística (Figura 1. 8). Se observa cómo, incluso dentro de la misma trama, las partes del tejido donde la densidad de edificación y la compacidad eran mayores (y probablemente la complejidad de la vida urbana y la mixticidad de usos), las edificaciones pervivieron más en el tiempo.



Figura 1. 8. Proceso de degradación de la trama urbana en Hazelridge, al Noreste de Detroit entre 2002 y 2015. (Fuente: Elab. propia a partir de las imágenes de *Google Street View* del Blog: <http://www.goobingdetroit.com/>).

En ecología, la resiliencia de los ecosistemas describe su capacidad de absorber perturbaciones sin alterar significativamente sus características de estructura y funcionalidad, pudiendo regresar a su estado original una vez que la perturbación ha cesado. El concepto de *resiliencia urbana* lleva implícito, por tanto, la noción de cambio como respuesta adaptativa a una nueva situación. Los aspectos ambientales han sido, desde siempre, un test de resiliencia para las estructuras urbanas: terremotos, inundaciones, sequías... y ahora, cambio climático y crisis energética.

Dentro de este contexto, se abren numerosos interrogantes sobre cuáles deben ser los cambios que deben experimentar las ciudades para hacer frente a los nuevos desafíos ambientales: ¿Cómo han de crecer las ciudades? ¿Hay que densificar la ciudad existente? ¿Hasta qué punto? ¿Qué argumentos servirán para dar forma (literalmente) a la ciudad? ¿Son útiles los cambios ligeros en la ciudad preexistente para mejorar su funcionamiento (piel) o es necesario intervenir drásticamente?

1.5. COMPORTAMIENTO ENERGÉTICO DE LA CIUDAD COMPACTA

En el debate tradicional sobre la forma de la ciudad, los asentamientos dispersos son habitualmente considerados como modelos *energívoros* frente a la alternativa más eficiente que representa la ciudad compacta. Durante las últimas décadas, se ha llevado a cabo un notable esfuerzo para cuantificar en la práctica los beneficios que presenta a nivel teórico el modelo centralizado.

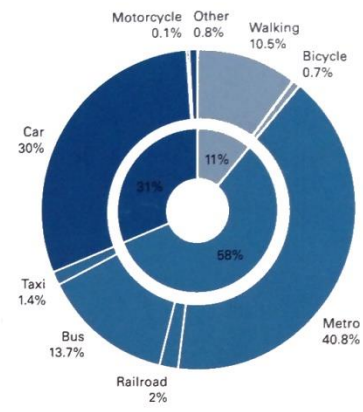
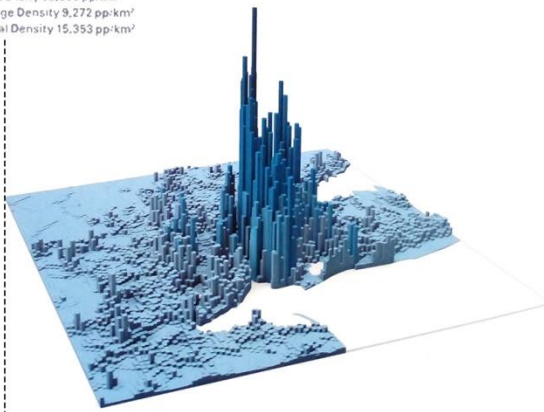
Los estudios señalan que la forma física urbana constituye uno de los factores influyentes sobre el comportamiento energético de las ciudades, afectando tanto a la energía destinada al transporte como al acondicionamiento ambiental de los edificios (Ewing 2010; Ratti et al. 2005; Steemers 2003). Sin embargo, los argumentos a favor de la ciudad compacta son menos categóricos de lo esperable *a priori*, tanto en relación a la energía consumida para transporte como para climatización, principales usos urbanos de la energía.

La relación entre el uso de energía para el **transporte de personas y mercancías** y la forma de la ciudad ha sido un tema que ha atraído históricamente el interés tanto de investigadores como de planificadores (Figura 1. 9). Dado que los patrones de transporte se ven afectados, no sólo por la forma de la ciudad, sino también por la distribución de los usos en ella, la disponibilidad de transporte público y otros aspectos socioeconómicos, dar una respuesta absoluta sobre la cuestión resulta complicado. A pesar de ello, las evidencias científicas parecen confirmar que los asentamientos dispersos son menos eficientes desde el punto de vista de energía consumida para transporte que los compactos (Rode et al. 2014), aunque las diferencias pueden ser menos significativas de lo previsto (Jenks et al. 1996). A este respecto, Neuman (2005) cita como ejemplo los estudios de Bouwman en los Países Bajos, donde las diferencias en los patrones de ocupación generaban variaciones inferiores al 5% en la energía per cápita consumida para transporte. Desde este punto de vista, se podrían obtener mayores beneficios ecológicos, y a más corto plazo, de los cambios tecnológicos (ej. coches “eco-friendly”) que de la modificación en los patrones de asentamiento (Jenks et al. 1996).

Por lo que respecta a la relación entre la **dispersión urbana y el consumo energético de los edificios**, a pesar de la reconocida importancia del tema, los estudios son relativamente escasos, especialmente, desde una visión cuantitativa (De Pascali 2008). Uno de los retos a los que debe hacer frente este tipo de trabajos es la dificultad para cuantificar la cantidad de energía consumida por los edificios. En primer lugar, los datos de consumo reales rara vez son accesibles y, si lo son, no están desagregados, por lo que resulta complejo discernir qué parte de dicha energía se destina al acondicionamiento ambiental. Además, los consumos energéticos se ven afectados por otros factores de tipo socio-económico, relacionados con el usuario. Por este motivo, la relación entre energía y forma urbana se basa habitualmente en la simulación de la demanda energética, como una aproximación teórica al consumo de los tejidos, basada en un usuario, unos tipos constructivos y un clima predefinidos. En este punto, resulta importante recalcar que la demanda constituye una variable derivada para el análisis del comportamiento energético de los tejidos, cuya causa primaria son los **intercambios de energía** del tejido urbano con su ambiente.

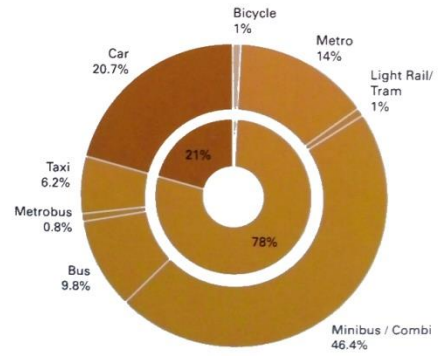
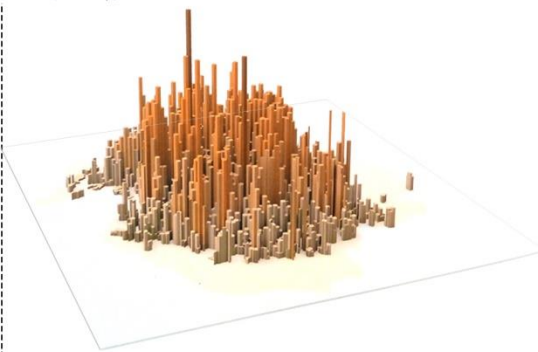
NEW YORK CITY – UPPER EAST SIDE

Peak Density 58,530 pp/km²
 Average Density 9,272 pp/km²
 Central Density 15,353 pp/km²



MEXICO CITY – MOLINO DE SANTO DOMINGO

Peak Density 49,088 pp/km²
 Average Density 5,786 pp/km²
 Central Density 12,880 pp/km²



LONDON – NOTTING HILL

Peak Density 17,324 pp/km²
 Average Density 4,497 pp/km²
 Central Density 8,326 pp/km²

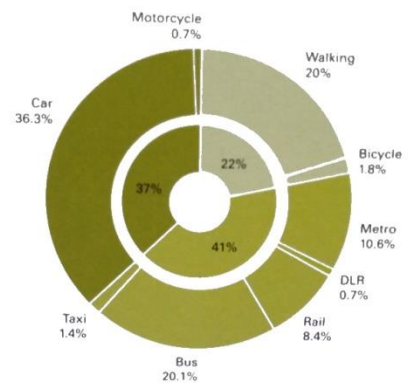


Figura 1. 9. Relación entre densidad urbana e intensidad de uso de distintos medios de transporte (Burdett & Sudjic 2011).

La magnitud de dichos intercambios se verá condicionada por la morfología de los tejidos de manera directa e indirecta. **A escala local**, la morfología del tejido condicionará **de manera directa** las posibilidades de los edificios de ventilarse, recibir radiación solar, enfriarse radiativamente hacia el cielo, intercambiar energía por conducción... **A escala de barrio**, la morfología del tejido ha demostrado influir sobre las condiciones ambientales del aire de la ciudad (efecto de isla de calor), afectando con ello **de forma indirecta** a su consumo energético para climatización.

Una parte importante de los estudios que correlacionan forma urbana y comportamiento energético, se llevan a cabo desde el **punto de vista del acceso solar**, centrándose en la interacción de aspectos geométricos (orientación, relación H/W) sobre la radiación solar incidente (componentes, directa y difusa, principalmente). De ellos, un número considerable se realizaron sobre modelos tipológicos, tanto bidimensionales inspirados en un cañón urbano ideal simétrico e infinito, como tridimensionales sobre tejidos idealizados (Oke 1988; Cheng, Steemers, Marylene Montavon, et al. 2006; Strømman-Andersen & Sattrup 2011; Garcia-Nevado et al. 2016).

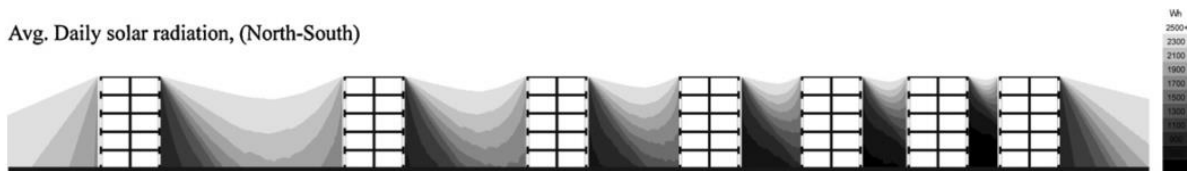


Figura 1. 10. Rad. solar promedio diaria incidente sobre cañones con distinta sección (Strømman-Andersen & Sattrup 2011).

Este enfoque tipológico presenta, sin embargo, limitaciones a la hora de incorporar la influencia de las irregularidades sobre el acceso solar en los tejidos reales (Curreli & Coch 2013). Por ello, gracias al avance de los métodos de cálculo, cada vez más estudios optan por un enfoque morfológico, donde la complejidad geométrica de la ciudad real es tomada en cuenta (Cheng, Steemers, Marylène Montavon, et al. 2006; Mohajeri et al. 2016; Compagnon 2004). En cualquier caso, los resultados de los estudios realizados desde ambos enfoques confirman que, a mayor oclusión del entorno, menor acceso solar, asociando a los tejidos compactos situados en climas fríos o templados un comportamiento energético deficiente desde este punto de vista térmico, y sobre todo lumínico.

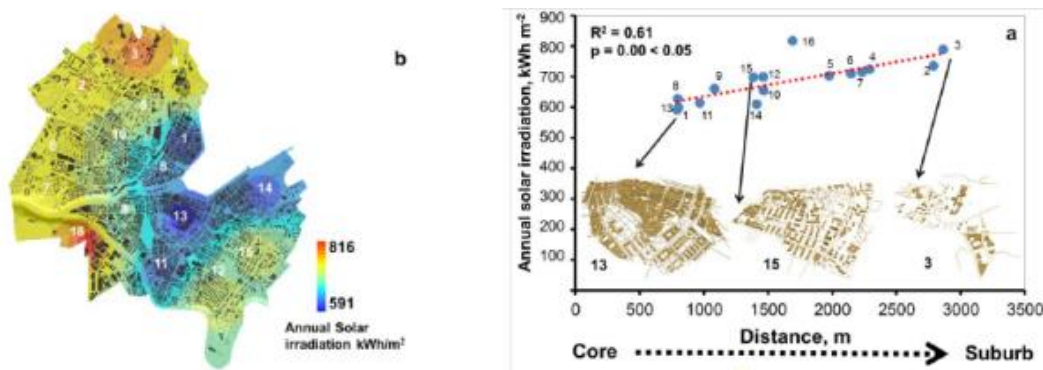


Figura 1. 11. Relación entre compacidad de varios tejidos de Ginebra y radiación solar incidente (Mohajeri et al. 2016)

A pesar de la notable influencia del acceso solar sobre el comportamiento térmico de los edificios, no es posible conocer el nivel de demanda de climatización de un tejido basándonos exclusivamente en este parámetro. Las interacciones entre los citados efectos directos e indirectos de la morfología afectan a la demanda de climatización de los edificios de una forma compleja (sobre todo en climas donde existe demanda tanto de calefacción como de refrigeración).

A nivel de tejido, las tramas densas presentan una Isla de Calor más intensa, siendo esperable un consumo de energía mayor para refrigeración y menor para calefacción. Salvati (2016) mostró, sin embargo, que si se consideraban de forma conjunta el efecto de isla de calor y los intercambios del edificio a escala local, las tramas más compactas (con mayor ocupación en planta y densidad vertical) eran las que presentaban menores demandas globales de climatización en un clima templado como el de Barcelona. El resultado se explicaba a partir del equilibrio entre captación solar en invierno, sombreadamiento de verano y fenómenos radiativos de segundo orden (atrapamiento radiativo como causa del efecto de isla de calor). El tejido urbano con mejor comportamiento entre los analizados se correspondía con el barrio del “Raval” de Barcelona, una trama preindustrial (Figura 1. 12).

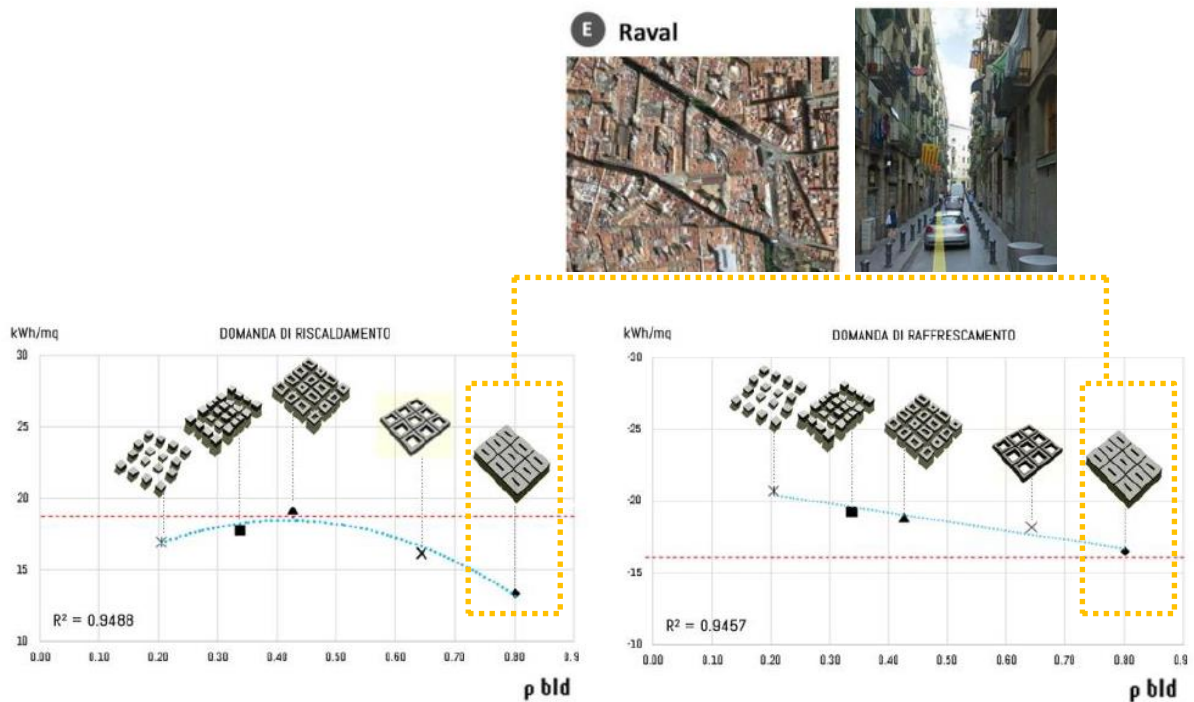


Figura 1. 12. Demanda de calefacción y refrigeración para tejidos con diferente densidad en Barcelona (Salvati 2016)

Este tipo de conclusiones sobre los tejidos compactos, poco intuitivas a priori, y a menudo contradictorias, son reflejo de la complejidad de los intercambios energéticos en ambientes urbanos reales, especialmente de los radiativos, que afectan al balance global de las superficies de forma no siempre evidente (Ghandehari et al. 2018). La presente tesis pretende reflexionar sobre esta cuestión en el caso de entornos reales, partiendo de la unidad urbana mínima: el cañón urbano. Para ello se analizarán las temperaturas que alcanzan sus superficies dentro de tramas compactas existentes, como reflejo físico final del balance de energía que en ella ocurre.

Geoméricamente, el cañón urbano se ha caracterizado de manera recurrente en base al **factor de vista del cielo** (en inglés: *Sky View Factor*), por la estrecha relación de este parámetro con el balance radiativo de un entorno particular, y en consecuencia, con su balance energético global (Johnson & Watson 1983; Oke 1978). Este indicador ha sido correlacionado con diversos aspectos energéticos como el estudio de la intensidad de la Isla de Calor (Unger 2004), de las posibilidad de iluminación natural (Cheung & Chung 2005), e incluso, de la radiación solar recibida por una superficie (Robinson 2006; Garcia-Nevado et al. 2015). Sin embargo, para obtener el balance radiativo completo (ondas cortas + ondas largas), hace falta calcular no solamente los factores de vista del cielo, sino también los **factores de vista de cada par de superficies de la escena entre sí**, para considerar las reflexiones difusas múltiples (Beckers 2009).

Como primera aproximación, analizaremos los factores de vista entre las distintas superficies en la geometría más simple de este tipo, un cañón simétrico infinito. En la Figura 1. 14, se representa el factor de vista de superficies que conforman la calle entre sí y con el cielo en función de su relación de aspecto ancho–alto (W/H). El gráfico evidencia que cuanto más angosta es la calle, más importantes son los intercambios radiativos entre los elementos construidos, en detrimento de los que se producen con el cielo. Dado que la relación entre factor de vista y proporción W/H de tipo exponencial (Figura 1. 14, arriba), el empleo de una escala logarítmica en el eje de abscisas puede ayudar en la visualización de los resultados (Figura 1. 14. abajo). Observamos que, en las calles de sección cuadrada, por primera vez, los intercambios radiativos de la fachada con el resto de superficies construidas (edificación vecina y pavimento) son de mayor magnitud que los que se producen con el cielo. La proporción $W/H=1$ es por tanto la frontera geométrica que marca la predominancia de los intercambios radiativos entre superficies construidas, subrayando con ello la importancia de las interreflexiones que entre ellas se produzcan. **Ésta será la relación de aspecto límite por debajo de la cual, en esta tesis, se hablará de “cañón” compacto.**

Sobre los factores de vista en entornos reales, es importante hacer dos consideraciones. En primer lugar, la presencia de irregularidades geométricas en los cañones, como intersecciones (Garcia-Nevado et al. 2016) odiferencias de altura entre fachadas, harán variar los factores de vista entre superficies (Figura 1. 13), creandose un “mapa de distribución” en función de la geometría del cañón. En segundo lugar, para el cálculo de temperaturas se deberán tener en cuenta los factores de vista entre punto y superficie, muy afectado por las obstrucciones geométricas particulares de su entorno.

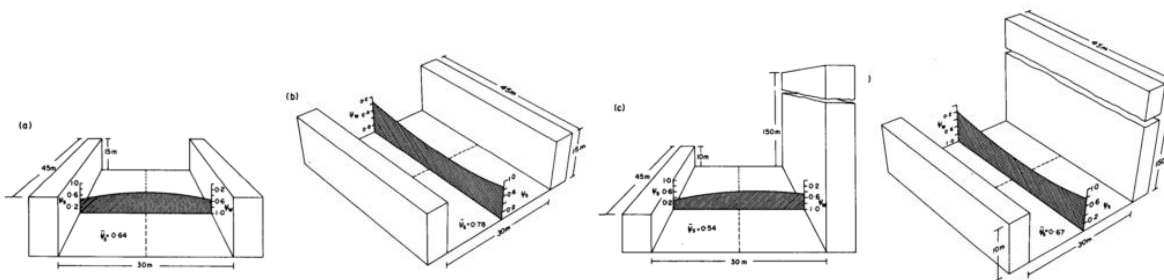


Figura 1. 13. Factores de vista de cielo sobre el suelo para diferentes cañones (Johnson & Watson 1983)

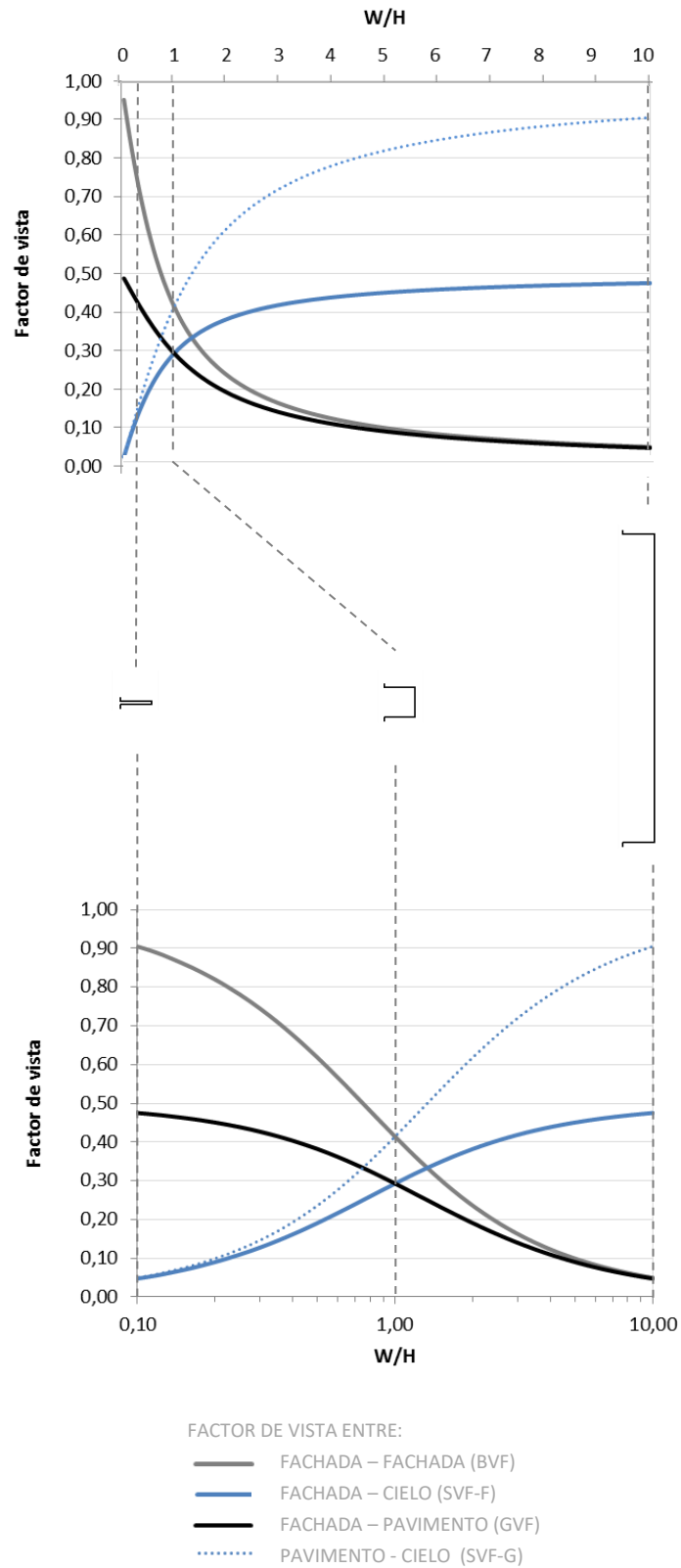


Figura 1. 14. Factores de vista entre las distintas superficies de un cañón urbano en función de su relación de aspecto en escala natural (arriba) y logarítmica (abajo).

1.6 ORIGEN E INTERÉS DE LAS TRAMAS COMPACTAS ESTUDIADAS



Figura 1. 15. Latitud de las tramas compactas estudiadas.

En esta tesis, se trabajará sobre las tramas de dos ciudades situadas en latitudes intermedias, Córdoba y Bayona (Figura 1. 15). En este epígrafe, destacaremos ciertos episodios de la historia de ambas ciudades en los que se produjeron procesos de densificación, de los que surgieron tramas urbanas compactas con distinta morfología, reflejo de la variación de los condicionantes históricos, sociales, constructivos, climáticos, etc. imperantes en cada localización y época histórica. La selección de estas ciudades se basó en dos motivos.

En primer lugar, porque **constituyen dos ejemplos representativos de tramas preindustriales generadas por dinámicas urbanas comunes** a numerosas ciudades del Sur de Europa. **El caso de Córdoba** ejemplifica los cambios experimentados por numerosas ciudades del Suroeste de Europa, desde la Antigüedad Tardía hasta el fin de la Edad Media (Murillo et al. 1997), que alterarían la configuración urbana romana para adaptarse a la concepción medieval de la ciudad. En Córdoba, estos cambios respondieron a la tradición árabe, y la imagen resultante es recurrente en numerosas ciudades del área mediterránea. **Con el caso de Bayona**, mostraremos un ejemplo extremo del papel de las murallas como generador de morfologías compactas a lo largo de la historia. La Bayona de los siglos XVII y XVIII tuvo que hacer frente a un notable crecimiento demográfico, en un área intramuros ya colmatada. Como consecuencia, el tejido urbano experimentó un notable creciendo en altura que generó una morfología altamente ocluida, típica de numerosos cascos históricos europeos. Este tipo de tejidos fueron el soporte urbano sobre el que tuvo lugar la Revolución Industrial y donde se generaron unas condiciones de vida insostenibles, que darían origen al debate sobre la densidad y la forma urbana que aún hoy continúa abierto.

El segundo motivo es que **ambas ciudades cuentan con Planes Urbanos** de intervención sobre los tejidos históricos, promovidos por unas Administraciones públicas sensibilizadas al respecto. Dichos planes tienen una doble finalidad. Por un lado, la conjugación entre la protección patrimonial en reconocimiento a unos ciertos valores urbanos e históricos y la revitalización de los tejidos. Por otro, la adaptación a los requerimientos de la sociedad actual (accesibilidad, habitabilidad, seguridad contra incendios, etc.), donde los aspectos energéticos han de ser considerados.

1.6.1 Córdoba, una densificación medieval

Al ver el laberíntico casco histórico de Córdoba hoy en día, resulta difícil imaginar que 2200 años antes, su trazado se organizaba según una malla ortogonal (Figura 1. 16). Unos profundos cambios poblacionales, sociales y políticos borrarón casi por completo los vestigios de la trama fundacional romana, realizado según un modelo que se repitió por todo el imperio. En menos de dos siglos, el urbanismo imperial, nacido de la planificación de los poderes públicos, daría paso a un proceso de consolidación urbano donde la iniciativa privada marcaría el devenir de la ciudad.

En el siglo XIX se produjeron actuaciones urbanísticas drásticas, como la demolición de las puertas y la mayor parte de la muralla, la creación de paseos, avenidas y nuevas vías, que dieron forma definitivamente al cinturón de rondas que rodea al casco histórico (Escobar Camacho 1987). La Córdoba de hoy se acabó de configurar con los nuevos desarrollos urbanos del siglo XX, especialmente durante los años 60, ya con una compacidad menor que el casco histórico.

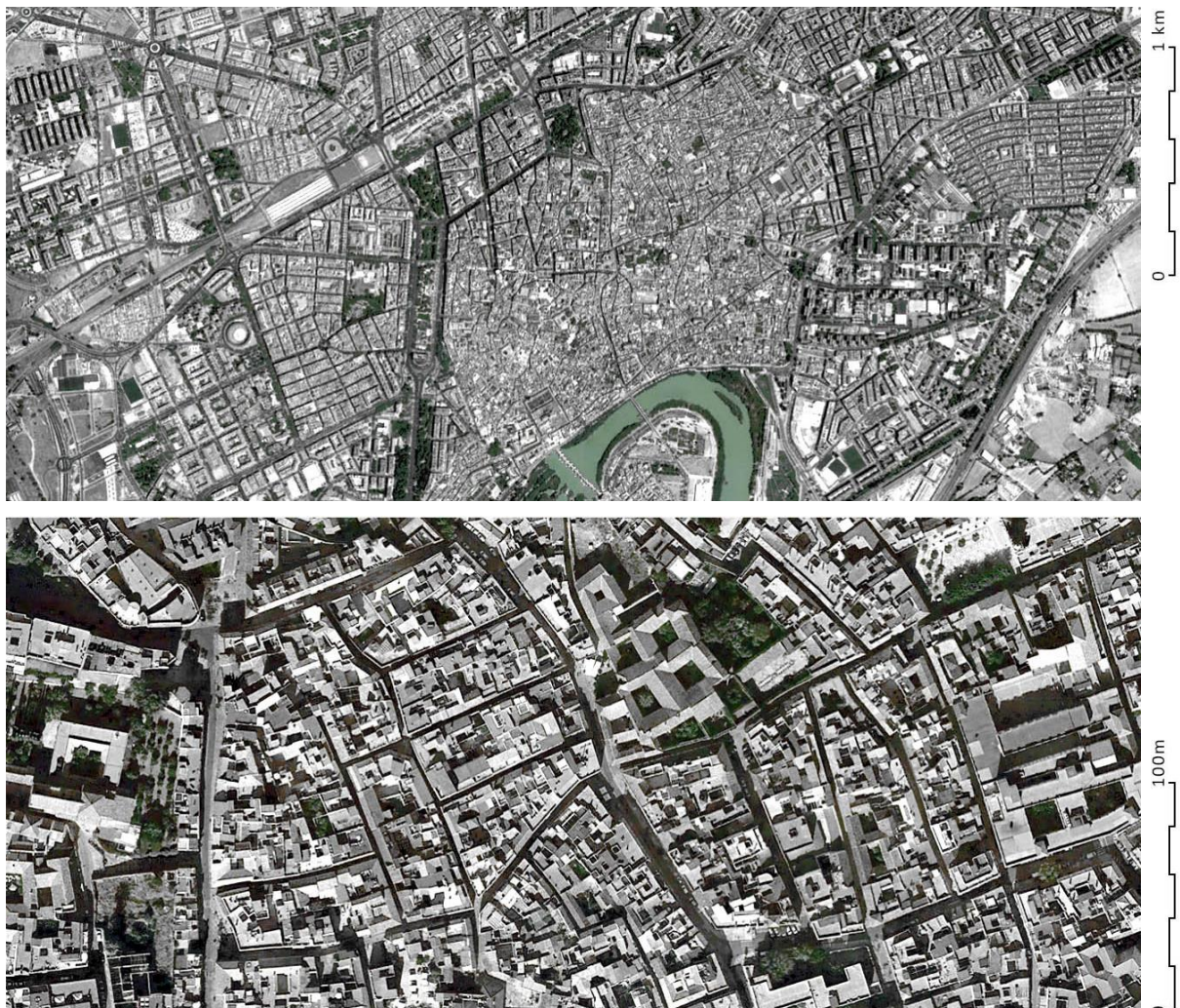


Figura 1. 16. Ortofoto de Córdoba a distintas escalas en 2018. (Fuente: Elab. propia a partir de *Google Earth Pro*).

[Córdoba Romana: implantación y difuminación de la malla ortogonal]

En el siglo II a.C., el pretor Claudio Marcelo ordena la creación de una nueva ciudad sobre un campamento militar preexistente, a 800 m al NO del asentamiento turdetano de *Corduba* (Murillo et al. 1997) (Figura 1.18). Limitada por una muralla poligonal y orientada de forma casi cardinal, se trazó una malla ortogonal isótropa con *insulae* de 75x75m, en la que únicamente destacaban el foro y tres vías principales (*kardo maximus* y dos *decumani maximi*). Apenas 100 años después, esta ciudad fundacional fue destruida a manos del ejército de César por su apoyo al bando Pompeyano (45 a.C.).

Lejos de desaparecer, dos décadas después *Corduba* sería refundada como Colonia Patricia Romana bajo el gobierno de Augusto, con un ambicioso programa urbanístico que cambió profundamente la imagen de la ciudad (Murillo 2008). Los límites de la muralla se ampliaron hasta el río *Betis*. A partir de una bifurcación del *kardo maximus* para adaptarse a la pendiente del terreno, el trazado fundacional se extendió siguiendo una trama ortogonal, esta vez, con *insulae* rectangulares de menor tamaño (35x70 m) con los lados largos orientados a SO y NE. Este proceso de rediseño urbano se aprovechó, además, para dotar a la ciudad de una red de abastecimiento/saneamiento de agua y para monumentalizar la *urbs* (Murillo 2008; Ventura Villanueva 2002). En una primera fase, se ensanchó el *Kardo Maximus* hasta los 22 m, se pavimentaron las calles, se construyó el teatro y se restauró el *Forum Coloniae*. En la segunda, se amplió el foro entre los dos *decumani Maximi*, con un anexo denominado *Forum novum*. Y, en la fase final, se construyeron un circo y un anfiteatro extramuros que generarían un eje de atracción Este-Oeste que marcó la imagen de la ciudad durante más de un siglo.



Figura 1. 17. Posible reconstrucción de la imagen original del teatro Romano y estado actual de la plaza y escaleras anexas al teatro romano, hoy integradas en el Museo Arqueológico de Córdoba. Fuente: (Márquez Moreno 2005)

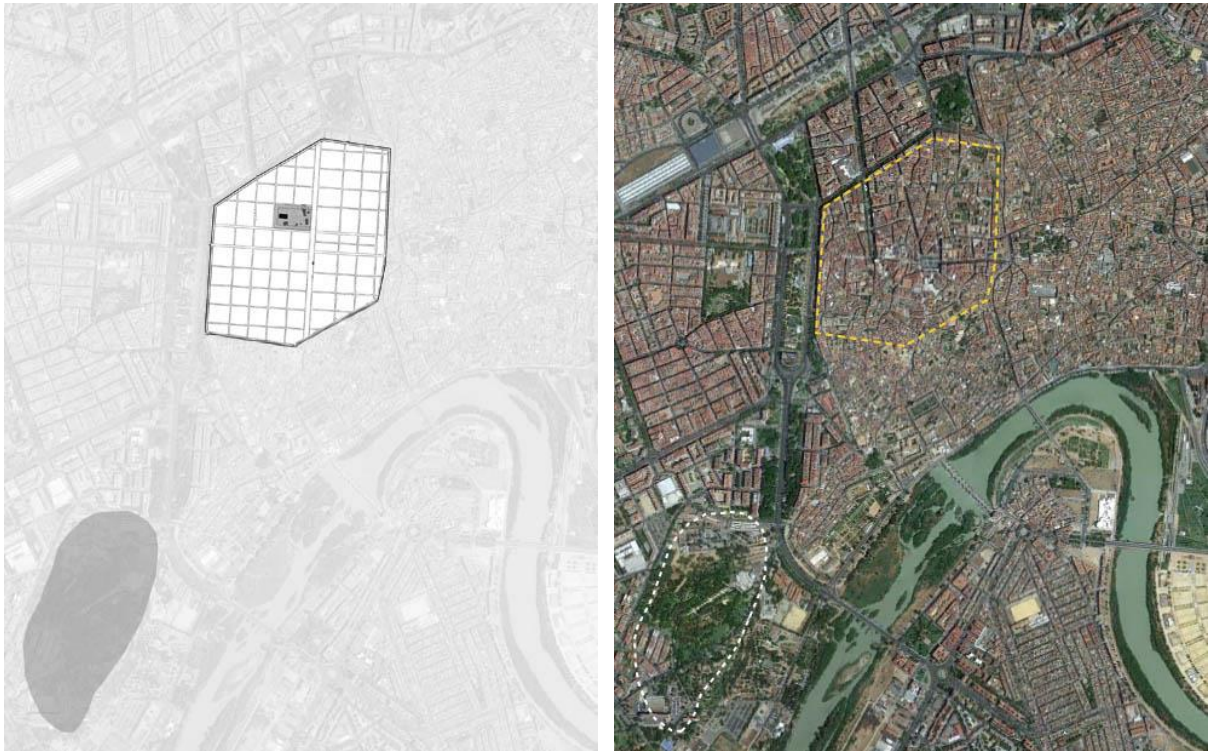


Figura 1. 18. Localización y extensión de la Corduba tartesio-turdetana y de la Corduba fundada por M. Claudio Marcelo en el 150 a.C. y su superposición sobre la trama actual de Córdoba (Fuente: Elab. Propia, a partir de Murillo 2008)

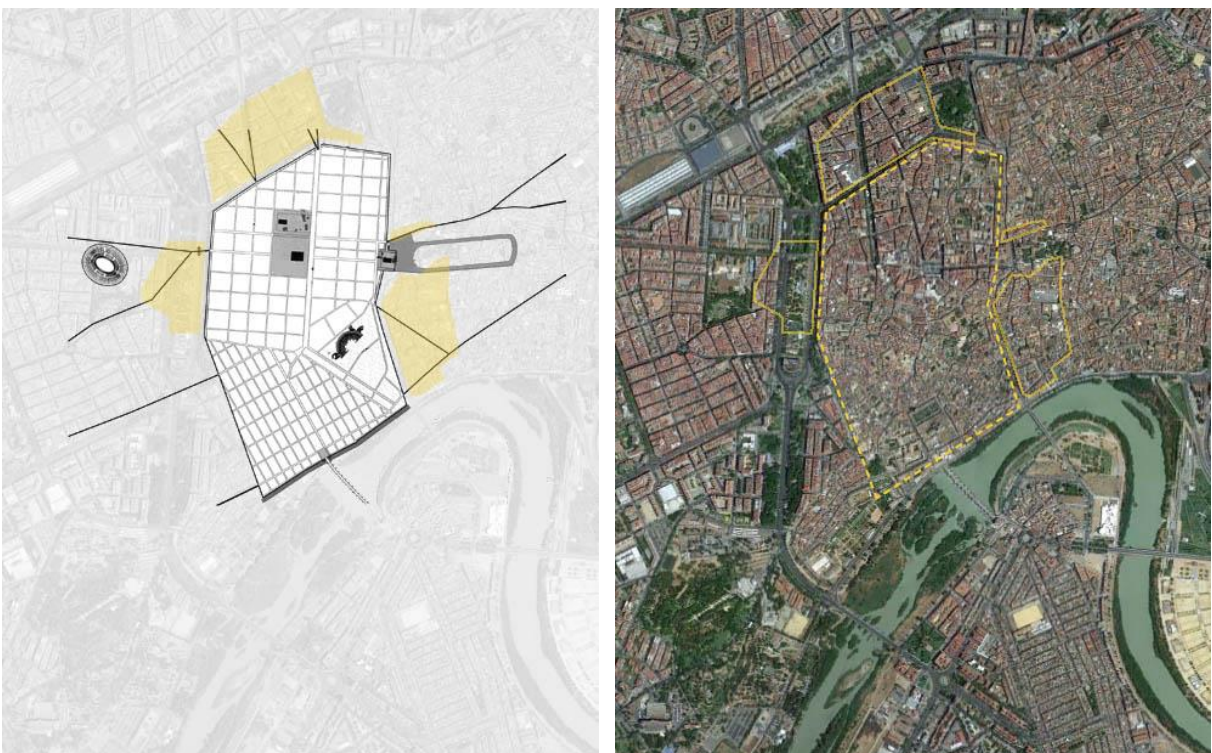


Figura 1. 19. Extensión aproximada de los barrios suburbanos entre el siglo III y IV y su superposición sobre la trama actual de Córdoba (Elab. Propia a partir de los planos de <http://www.arqueocordoba.com>)

Durante los siglos I y II d.C., la ciudad experimentó un notable desarrollo económico y demográfico, que se tradujo en un aumento de la urbanización. Sin embargo, este proceso no condujo de manera inmediata a la colmatación del tejido intramuros, donde numerosas *insulae*, sobre todo en el sector Sur, permanecieron como solar hasta el s. II (Murillo 2008), ya que parte del crecimiento urbano fue absorbido por nuevos *vici*, barrios extramuros situados frente a las puertas de la urbe.

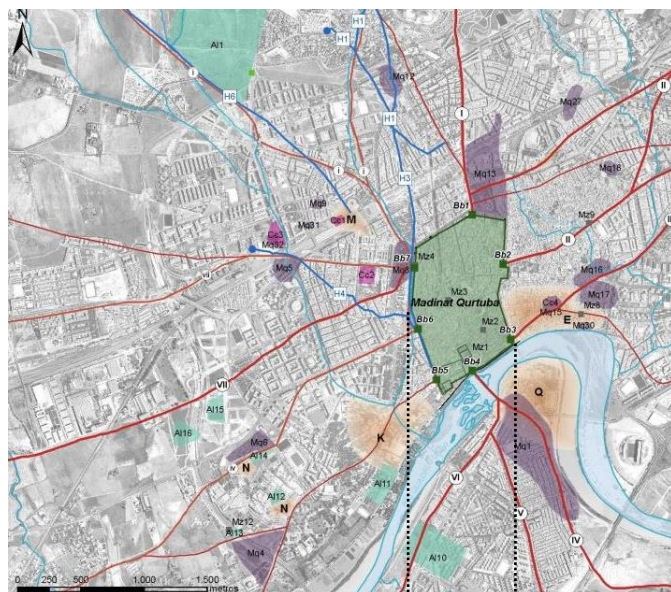
Esta intensa actividad urbanizadora continuó hasta el s. III, momento en que la Córdoba romana alcanzó su mayor extensión espacial y las mayores densidades del espacio intramuros. En los siglos III y IV, periodo de decadencia económica e inestabilidad política del Imperio en su conjunto, se inició de una etapa de contracción urbana (Vaquerizo & Murillo 2010). Las labores de conservación de los espacios públicos se fueron abandonando gradualmente (las calles pierden su enlosado, se dejan de limpiar las cloacas...). Ciertos barrios, primero suburbanos y después intramuros, comenzaron a despoblarse de forma lenta pero paulatina. Este proceso de degradación urbana acabaría incluso por desdibujar la trama viaria. Durante la etapa visigoda, entre los siglos VI y VII, este modelo urbano discontinuo y disperso, donde se alternan solares construidos con edificaciones diversas y terrenos baldíos, acaba por consolidarse y siendo la tónica general hasta el siglo VIII.

[Córdoba musulmana: transición a una densa trama orgánica]

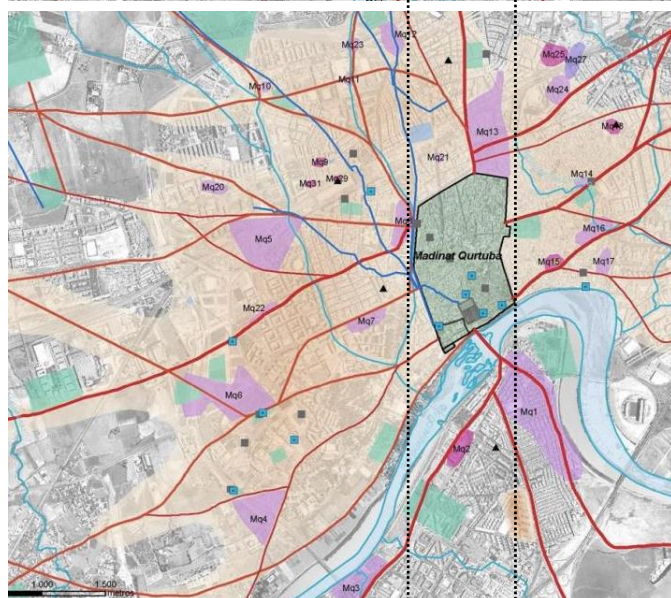
Cuando los musulmanes llegaron a la ciudad en el 711, ésta se encontraba en un estado de decadencia y abandono, alejado del esplendor de la época romana: *“murallas parcialmente derruidas, puente abandonado y cortado, extensas zonas de la parte Norte de la ciudad desurbanizadas y transformadas en cementerios...”*(Murillo et al. 1997). Como veremos a continuación, durante los aproximadamente 500 años que duró su dominio, la estructura urbana de la ciudad sufrió profundos cambios que generaron una nueva morfología que, con escasas modificaciones, ha pervivido hasta nuestros días (León Muñoz & Blanco Guzmán 2010; Acien Almansa 2001).

La transición al modelo de ciudad islámica no fue abrupta, sino que se produjo de forma gradual e ininterrumpida. Durante las primeras décadas de ocupación, los conquistadores islámicos establecen la Medina en la antigua ciudad romana alto-imperial, respetando en gran medida la morfología y funcionalidad heredadas de la ciudad visigoda, mientras que la comunidad cristiana (mozárabes) habitó fundamentalmente más allá de las murallas, cerca de las iglesias y monasterios visigodos (SISIFO 2018).

A partir del gobierno de Abderramán I (756-788), con la instauración del Emirato Independiente de *Qurtuba*, los cambios urbanos comienzan a intensificarse. Durante su mandato, se reformó el Alcázar para dar cabida a la nueva administración del Estado, se fundaron la Ceca, la Alcaicería y la Casa de Correos, y se construyeron numerosas mezquitas, entre las que destaca la Mezquita Aljama.



CÓRDOBA EN ÉPOCA EMIRAL (S.IX)



CÓRDOBA EN ÉPOCA CALIFAL (S.X)



CÓRDOBA EN ÉPOCA TARDO-ISLÁMICA (S.XII)

Figura 1. 20. Extensión de Córdoba entre el s. IX y el s. XII (SISIFO 2018).

Durante el siglo IX, las transformaciones en el recinto amurallado continuaron, con la reparación del malecón para prevenir las crecidas del río y la primera ampliación de la Mezquita aljama por parte de Abderramán II (SÍSIFO 2018). El siglo IX coincide, además, con un notable crecimiento demográfico: la ciudad pasa de 160.000 a 200.000 habitantes en menos de 100 años (Reba et al. 2016). Este hecho tuvo importantes consecuencias sobre la configuración de la ciudad, provocando una densificación intramuros y la expansión de arrabales. Estos crecimientos extramuros inicialmente se concentraron en las proximidades del río y, más tarde, en torno a dos calzadas que salían de la medina en su sector más oriental, conocido como la *Axerquía* (Blanco-Guzmán 2014).

El momento de máximo esplendor de la Córdoba islámica se alcanza en época de Abderramán III, con la proclamación del Califato Independiente en el año 929. La supremacía política de la ciudad se traduce en un espectacular crecimiento poblacional, que convierte a Córdoba en la ciudad más grande de su tiempo, con 450.000 habitantes a finales de siglo. Dicho desarrollo demográfico se formalizará a nivel urbano de dos maneras. Por un lado, con la fundación de dos ciudades palatinas *ex novo* en las proximidades: *Madinat al-Zahara* en 940 (que acogería la nueva sede de la corte califal) y *Madinat al-Zahira* en 988 (en la margen derecha del Guadalquivir). Por otro, con la extensión y densificación de los arrabales extramuros. *Qurtuba* alcanza así una enorme extensión (similar a la actual), convirtiéndose prácticamente en un continuo urbano entre los tres núcleos.

La llegada del siglo XI marca el fin del esplendor del califato cordobés. El estallido de la *Fitna* (guerra civil) inicia un periodo de inestabilidad que duraría hasta 1031. Sus consecuencias a nivel urbano fueron devastadoras e incluyeron el saqueo y la destrucción de las ciudades de *al-Zahira* y *al-Zahara* por parte de las tropas bereberes (1009), de las grandes almunias suburbanas y de los arrabales occidentales (1013), los más poblados en aquel momento (León Muñoz & Blanco Guzmán 2010). Estos acontecimientos precipitaron la quiebra del Estado Omeya, y trajeron consigo un repliegue de la ciudad sobre el recinto amurallado de la *Madina* y los arrabales del sector oriental, que no resultaron afectados por el proceso de saqueo.

En los siglos XI y XII, la ciudad vivió un periodo de militarización, como respuesta a la inestabilidad política interna y al imparable avance cristiano (sobre todo, tras la reconquista de Toledo en 1085). Durante el siglo XI, se construyó la muralla oriental de la *Axerquía*, duplicándose la extensión intramuros de la ciudad. Asimismo, en la segunda mitad del siglo XII, se multiplicaron los esfuerzos para reforzar y ampliar las defensas de la ciudad, quizás, más que en ningún otro momento de su historia (León Muñoz & Blanco Guzmán 2010). Esta renovada funcionalidad militar se tradujo en una cierta revitalización urbana y crecimiento poblacional con nuevos espacios residenciales tanto al interior como al exterior de las murallas. Intramuros, la ciudad se compactó, creciendo en altura como lo muestran los vestigios de numerosos pórticos con galerías encima para acceder a las habitaciones superiores de la etapa almohade (Orihuela 2007). Extramuros, sin embargo, el resurgimiento fue efímero, según los registros arqueológicos (León Muñoz & Blanco Guzmán 2010). De esta manera, a finales del s. XII, *Qurtuba* quedó circunscrita a la ciudad amurallada, extensión que mantendrá durante la Baja Edad Media y la época Moderna.

Así pues, la ciudad de Córdoba conquistada por Fernando III en 1236 poco se asemejaba ya a aquella gran urbe del siglo X (Escobar Camacho 1987). En los siglos posteriores, la trama urbana experimentó ligeras modificaciones de la herencia musulmana recibida para adaptarla a los nuevos usos y formas de vida de sus pobladores. Los adarves que no conducían a parte alguna, o las pequeñas plazas del interior de la complicada red viaria, empezaron a desaparecer, incorporándose a los edificios colindantes, sobre todo en la segunda mitad del siglo XV. Algunas de las calles más estrechas fueron ensanchadas para facilitar el transporte con vehículos de ruedas, especialmente a partir del siglo XVI. Estas actuaciones transformaron en parte la morfología urbana, pero no afectaron a su configuración general, que se ha mantenido hasta nuestros días (León Muñoz & Blanco Guzmán 2010).

De la trama romana a la islámica

Si bien es cierto que la imagen global de la trama musulmana poco tiene que ver con la romana, entre ambas existen puntos de encuentro. Comparando ambos tejidos, observamos que en el trazado árabe se respetaron los límites físicos de la muralla y el papel de las puertas como elemento configurador de la trama urbana (Figura 1. 21). De hecho, las vías romanas con un carácter más territorial son legibles en el trazado musulmán intramuros, sobre todo en los tramos próximos a la muralla de la *Madina* y en la *Axarquía* (ej. la Vía Augusta). Así pues, en la trama islámica es posible identificar unas vías con una jerarquía superior, gracias a su continuidad en el territorio y su función como conector entre equipamientos urbanos (ej. mezquitas y zocos). Dichas vías dividen la ciudad en una especie de sectores que se “rellenan”, ahora sí, con un tejido de morfología diferenciada de la romana: i) las calles se estrechan, favoreciendo que la ciudad se torne compacta dentro del recinto amurallado; ii) el trazado se vuelve laberíntico e irregular, por lo que, a diferencia del romano, ninguna orientación predomina; iii) la calles pierden su continuidad.

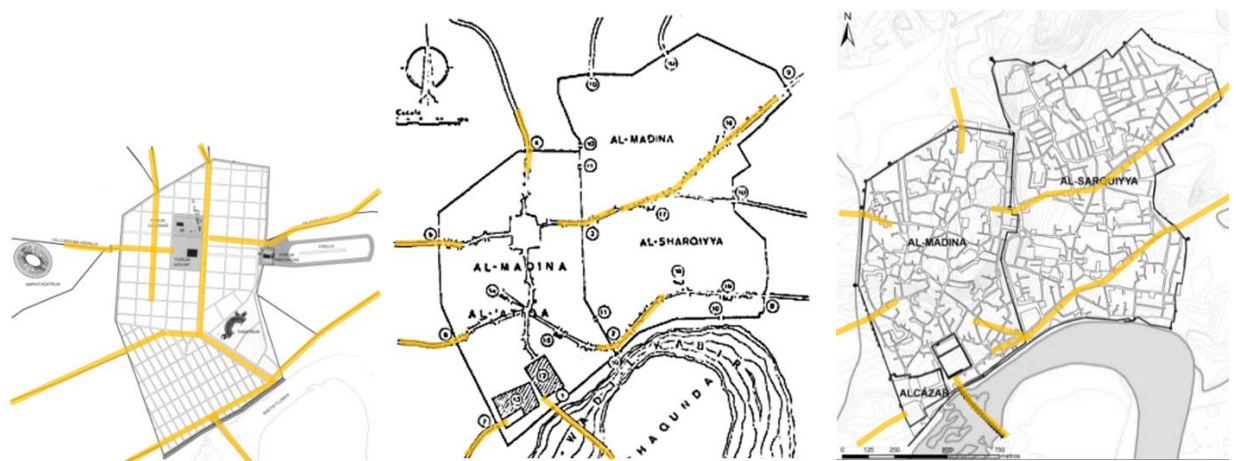


Figura 1. 21. Continuidad entre el trazado viario romano, musulmán y cristiano en Córdoba. De izquierda a derecha: Trazado romano y sus vías territoriales (SISIFO 2018); Vías principales del trazado musulmán en relación a las puertas de la muralla (Escobar Camacho 1987); Reconstrucción del trazado urbano a la llegada de Fernando III (SISIFO 2018).

Este tipo de morfología es el resultado de una agregación de edificaciones individuales que no obedece a ninguna norma urbanística dictada por los poderes públicos. El elemento generador del urbanismo islámico es la vivienda, a la que se adosan otras viviendas, hasta formar grandes manzanas perforadas por la red de adarves que dan acceso a todas ellas (Pérez-Ordóñez 2010). Esta prevalencia de lo privado sobre lo público se evidencia en el derecho de *finá* (Acién Almansa 2001) y en la ausencia de ágoras o lugares público para reuniones y espectáculos (Cabrera Muñoz 1998).

Hasta este momento, hemos reflexionado sobre los cambios urbanos entre las tramas romana e islámica en dos dimensiones, material más abundante sobre la historia urbana de Córdoba. A pesar de ello, intentaremos hacer una aproximación a los cambios morfológicos que sufrió la calle con la transición entre las dos tramas. La **anchura de las calles** en la Córdoba romana variaba entre los 22m y 8 m (*kardo maximus* y *decumanus*) y los aproximadamente 4.5m de las vías secundarias (SISIFO 2018). En cambio, en la trama islámica, se distinguían básicamente entre vías públicas (de 3,23 a 3,50 m) y los adarves (entre 1,84 y 2,00 m). Por lo que respecta a **la dimensión vertical de la ciudad**, realizaremos estimaciones en base a la información disponible sobre la vivienda, elemento básico de ambas tramas (Orihuela 2007). En el caso romano, era habitual que la casa tuviese una o dos plantas (SISIFO 2018), mientras que en el árabe, eran habitualmente de dos (Pérez-Ordóñez 2010) y en algunos casos, de tres (Blanco 2012). Esto implica que la densificación del tejido se produjo en vertical, pero sobre todo en horizontal, estrechándose las calles y en algunos casos las dimensiones de los patios. Otro aspecto relevante es el de la **orientación del tejido**. En el caso romano, la trama reticular da unas opciones limitadas de orientación de las calles, según los puntos cardinales con una ligera desviación, mientras que, en el caso árabe, no existe orientación predominante.

Como resultado de estas transformaciones, se configura un tejido urbano compacto y, a la vez, perforado, con patios como reguladores del clima interior de la vivienda (Rojas-Fernández et al. 2017). Las calles, cuya principal función es de circulación, se caracterizan por una alta oclusión (bajo W/H), fachadas altamente reflectivas y con pocos huecos. Como ejemplo ilustrativo de estas características, se seleccionó como caso de estudio, la Calle de la Rejas de Don Gome, situada en el barrio de la Axerquía, cuya sección se presenta en la Figura 1. 22.



Figura 1. 22. Sección transversal promedio de la Calle de las Rejas de Don Gome de Córdoba.

1.6.2 Bayona, una densificación moderna

Con una escala mucho más humilde que Córdoba, la historia urbana de Bayona resulta interesante como trama compacta, en primer lugar, por tratarse de uno de los tejidos más densamente edificados de Francia, resultado de un fuerte crecimiento en vertical. Pero también, como veremos a continuación, por constituir un ejemplo de resiliencia de las tramas urbanas frente a importantes cambios en las condiciones naturales o en los requerimientos habitacionales.

Pontet-Fourmigué (1990) define Bayona como “una ciudad de paso y de contacto”, algo fácil de comprender en vista de su ubicación. Por un lado, la ciudad se encuentra a unas decenas de kilómetros al Norte de la frontera entre Francia y España. Esto la convirtió, desde su fundación, en un punto militar estratégico y en parte de las rutas de comunicación entre ambos territorios. Además, asentada en la confluencia de los ríos Nive y Adour, cerca de su desembocadura, Bayona es, asimismo, puerto fluvial y marítimo. Este doble carácter militar y portuario explica en gran medida el devenir histórico de la villa y la morfología que de él resultó. (Duplantier & Contamin 2012).

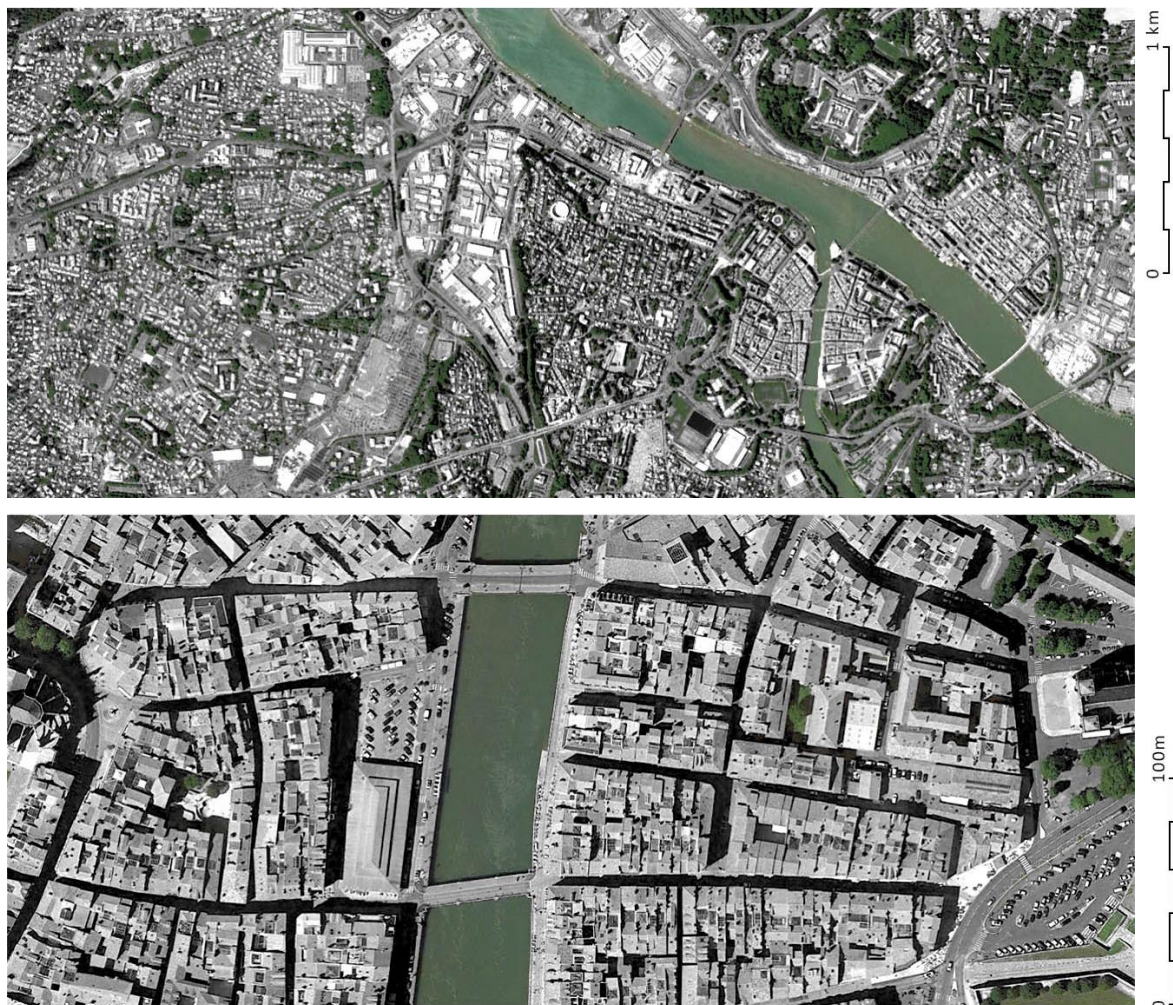


Figura 1. 23. Ortofoto de Bayona a distintas escalas en 2018. (Fuente: Elab. propia a partir de Google Earth Pro).

[Bayona, desde su fundación hasta la edad Moderna]

Los restos arqueológicos demuestran la existencia de ocupación humana organizada en Bayona, al menos, desde el siglo 1 d.C. Ésta, sin embargo, no tendría un carácter plenamente urbano hasta la fundación del *Castrum* romano de *Lapurdum*, hacia finales del siglo III o principios del IV. De la fundación romana, más allá de ciertas partes de la muralla y el trazado del *kardo* y del *decumanus*, poco ha llegado hasta nuestros días (Figura 1. 24). De hecho, los cinco siglos posteriores a dicha fundación constituyen una página casi en blanco de la historia de la ciudad, con sólo algunas referencias sobre las consecuencias de las invasiones bárbaras (Bochaca & Bolumburu 2016).

Desde el siglo X, la ciudad se configura como un importante puerto de marineros, pescadores y comerciantes de la región de Aquitania (Pontet & Bériac 1992). Sin embargo, los primeros síntomas de la verdadera renovación urbana que transformó el antiguo *Castrum de Lapurdum* en la ciudad medieval de Bayona no llegaron hasta el siglo XI, impulsados por dos acontecimientos. El primero fue la creación del Vizcondado de Labourd por parte del Rey de Navarra Sancho y la designación de Bayona como su sede. El segundo fue la restauración de Bayona como sede del obispado. Se definen así dos figuras que serán clave para la evolución de la ciudad en los siglos venideros: el Obispo de Bayona y el Vizconde de Labourd, representante del conde de Gascuña (Bochaca & Bolumburu 2016). A mediados de este siglo, aparecieron los primeros arrabales de la ciudad (*Faubourgs*), como continuación de las vías principales intramuros hacia la *Nive*, marcando la dirección de los futuros puentes.

En el siglo XII, la ciudad experimentó un marcado crecimiento poblacional y urbanístico impulsado por varios hechos políticos y religiosos. Por un lado, el Obispo recibió carta blanca para poblar la ciudad y desarrollar sus actividades, gozando de una exención de impuestos para favorecer el aumento de población (1125). Además, obtuvo el derecho de crear un nuevo asentamiento en la orilla derecha de la *Nive* bajo autoridad eclesiástica (*sauveté*). Por otro lado, la Duquesa Leonor de Aquitania, también Condesa de Gascuña y exesposa del Rey de Francia Luis VII, contrajo matrimonio con Enrique Plantagenêt, posteriormente Enrique II Rey de Inglaterra. Bayona pasó así a manos inglesas, donde permaneció durante tres siglos. Este período sería una etapa dorada para la villa, como puerto comercial entre Francia e Inglaterra, lo que se tradujo en una importante actividad edificatoria intramuros y, sobre todo, extramuros (Duplantier & Contamin 2012). En el siglo XII, se desarrollaron tres nuevos suburbios a la salida de los puentes: dos en la orilla derecha de la *Nive* y otro en la del *Adour*. Su parcelación regular y estructurada parece responder a una planificación previa, sólo explicable de haber sido organizada por los terratenientes del *Castrum*, nuevamente, el Obispo de Bayona y el Vizconde de Labourd. A finales del siglo XII, los crecimientos al otro lado de la *Nive* ya están amurallados.

Entre los siglos XIII y XV, la ciudad continuó su expansión en torno a edificios eclesiásticos (conventos, parroquias, hospitales...). El tamaño de los arrabales y la población que acogieron llegó a ser de tal relevancia que, en algunas ocasiones, es equiparable a la propia ciudad, como en el caso de *Saint-Leon* en el s. XIV (Bochaca & Bolumburu 2016).

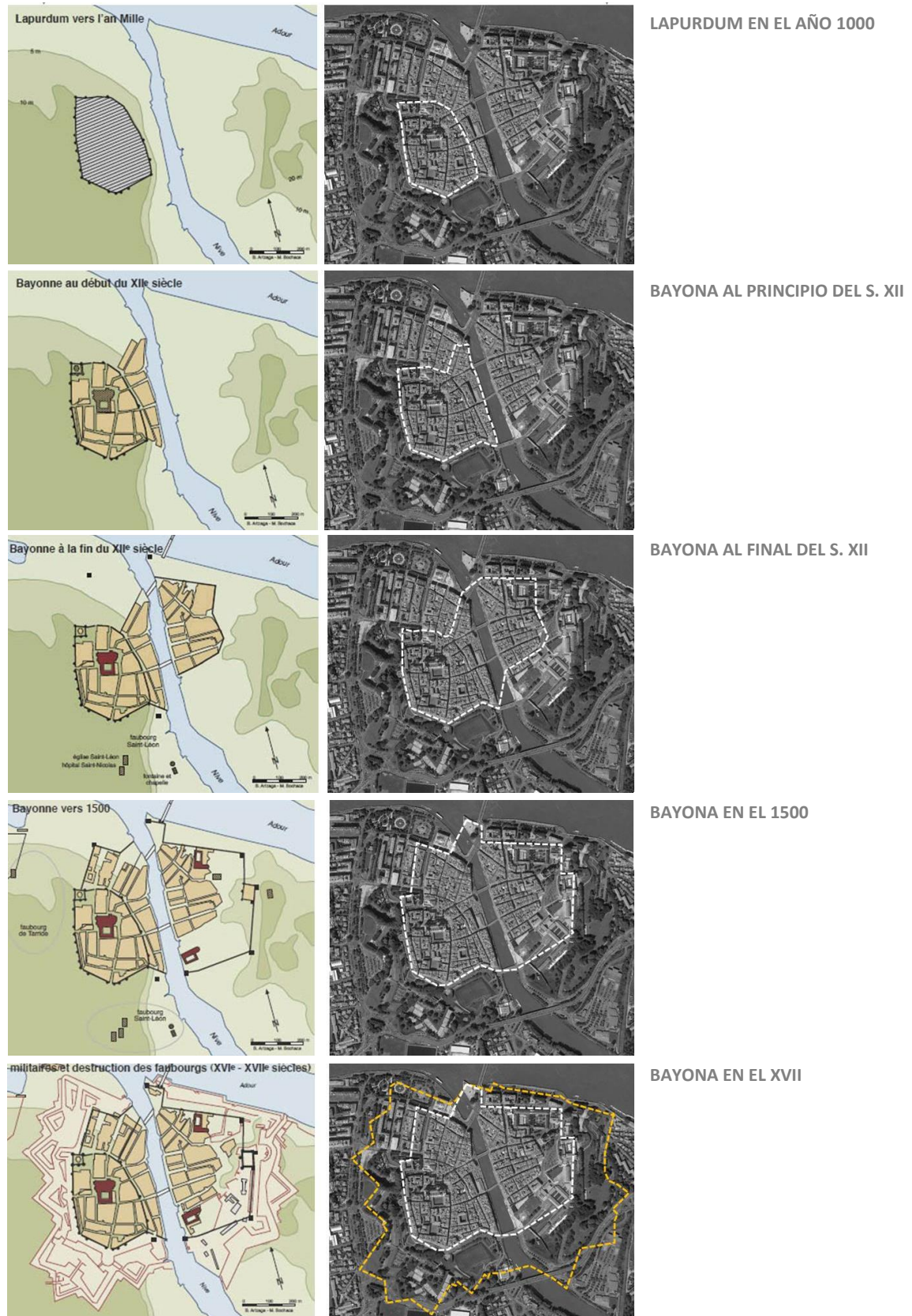


Figura 1. 24. Reconstrucción de la evolución urbana de Bayona entre el s.XI u el XVII (Elab. propia a partir de (Bochaca & Bolumburu 2016))

En la segunda mitad del siglo XV, la etapa de prosperidad vivida por Bayona llega a su fin. En 1451, la ciudad volvió a manos francesas tras el asedio de las tropas de Carlos VII. El fin a las relaciones comerciales con Inglaterra generó una crisis económica que se vio agravada por un fenómeno natural. En 1480, tras un fuerte temporal, la desembocadura del río *Adour* se desplaza algunos km hacia el Norte, privando a Bayona del acceso directo al mar durante varias décadas. La parálisis del puerto asfixia económicamente la ciudad (Pontet & Bériac 1992).

A partir de este momento, los conflictos con Inglaterra pasaron a un segundo plano. Sin embargo, el carácter militar de la ciudad lejos de desaparecer, se intensifica. En aquella época, el problema lo representaba la situación fronteriza de la ciudad con España. Bayona se convirtió en la última plaza fuerte del Reino de Francia, en un momento de avance armamentístico, en el que las altas murallas verticales dejan de ser útiles frente al ataque de los nuevos cañones (Duplantier & Contamin 2012).

Ante esta nueva coyuntura, durante los siglos XVI y XVII, la ciudad multiplicó sus esfuerzos por reforzar las defensas: se creó una torre en la confluencia entre la *Nive* y el *Adour* que permitía el cerrar el río; se construyó un nuevo castillo, el *Château Neuf*, para defender de atacantes externos (pero también de los posibles problemas con la población local, como demuestran sus torres hacia el interior); se levantó una segunda línea de muralla, capaz de soportar los nuevos ataques de artillería de la época; comenzó la demolición de los *Faubourgs*, posible refugio de atacantes... Además, tras la creación de una nueva desembocadura artificial del río en *Boucau* en 1578, por el ingeniero Louis de Foix, la prosperidad del puerto de Bayona resurge y, con ello, la vitalidad económica de la ciudad.

En el siglo XVII, Bayona se convirtió en un sitio comercial primordial para las naves de la armada a Terranova y las Antillas (Duplantier & Contamin 2012). Este nuevo florecimiento económico permitió acometer las obras defensivas de la etapa del renacimiento que aún hoy son visibles, diseñadas por el ingeniero el Rey, *Errard de Bar-le-Duc*: bastiones en forma de oreja, fosos, medias lunas...



Figura 1. 25. Desplazamiento de la desembocadura del río Adour (En: Bochaca & Bolumburu 2016).

[El crecimiento vertical de Bayonne en los s. XVII y XVIII]

La historia de las ciudades se cuenta, en muchas ocasiones, a partir únicamente de su evolución en dos dimensiones. Sin embargo, para describir los cambios urbanos acontecidos en Bayona entre los siglos XVII y XVIII, es imprescindible hablar de su dimensión vertical.

Una de las causas de la transformación vertical de Bayona fue la memoria que el Mariscal de Francia y famoso ingeniero militar real, Vauban, encargó sobre las edificaciones de la villa en 1694. Este documento describe, calle a calle y de manera exhaustiva, los tipos constructivos de la ciudad, reflejando los posibles problemas en relación con el riesgo de incendio. La memoria mostraba que, en este momento, la mayoría de las casas constaban de una o dos plantas con el piñón hacia la calle. Su sistema constructivo consistía en un entramado de madera (*pan de bois*) relleno, generalmente, de un mortero de arcilla con fibras naturales (*torchis*). Además, la mayoría de las fachadas tenían unas ménsulas (*encorbellements*) muy pronunciadas que se proyectaban sobre la calle, reduciéndose considerablemente la distancia entre edificaciones enfrentadas. Estas características suponían un riesgo notable de propagación del fuego, no sólo entre edificios medianeros, sino también entre las fachadas enfrentadas (Duplantier & Contamin 2012). A raíz de esta memoria, en ese mismo año, entró en vigor una ordenanza que obliga a demoler las fachadas y reedificar respetando la alineación de la planta baja y en piedra para limitar el riesgo de incendio en una ciudad cada vez más densa.

En paralelo a este proceso de transformación urbana iniciado con Vauban, la morfología de Bayona cambió radicalmente, fruto de un dramático aumento de la densidad construida. Para acoger a la población desalojada de los Faubourgs, se elevó la altura de la edificación sobre el trazado medieval preexistente, llegando incluso a multiplicar 2.5 veces la altura inicial (Figura 1. 26). Además, se “macizó” el interior de la manzana, ocupándose casi la totalidad del espacio de manzana, lo que generó notables problemas de iluminación, ventilación, térmicos... (Figura 1. 27).

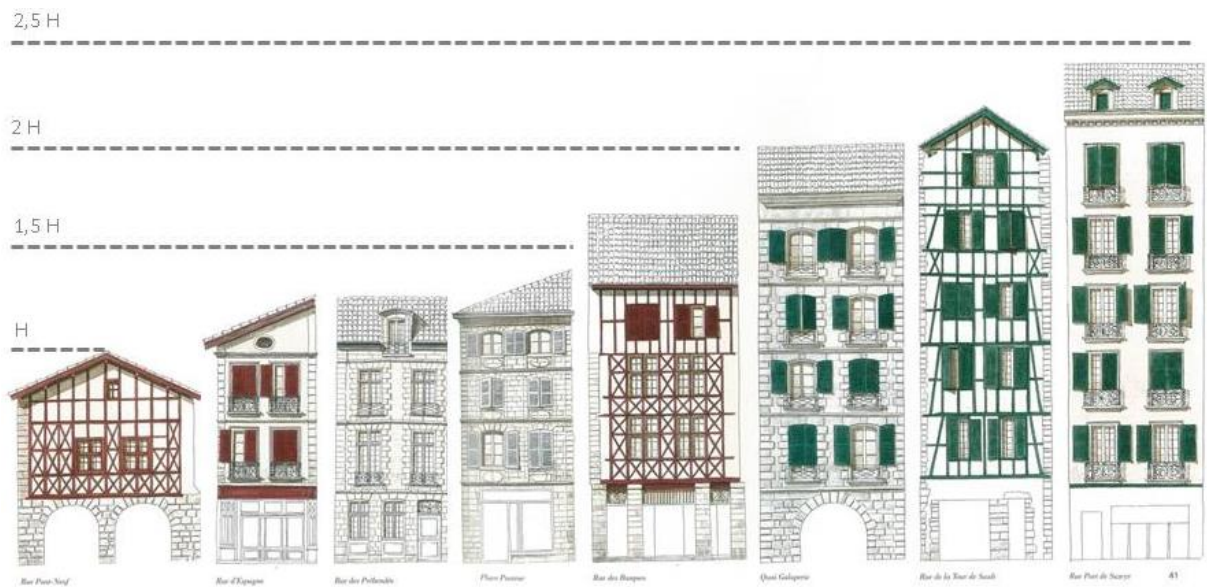


Figura 1. 26. Evolución en altura de las viviendas en Bayona (Reelaboración a partir de (Duplantier & Contamin 2012).

BAYONA EN EL XV (Edad Media)



BAYONA EN EL XVII (Después de Vauban)



Figura 1. 27. Ilustraciones sobre el cambio de la volumetría urbana de Bayona. (Duplantier & Contamin 2012)

[Bayona hoy y el reto de la densidad sostenible]

Con la pérdida de la utilidad de las murallas, en el siglo XIX, se planteó la cuestión de qué hacer con los terrenos de la zona de exclusión que rodeaban al casco antiguo. Estas áreas acabaron por convertirse en zonas verdes y equipamientos deportivos en el siglo XX, otorgando a Bayona su aspecto urbano actual: un núcleo urbano densamente edificado separado de un mar de edificaciones unifamiliares por un cinturón verde. De esta forma, en Bayona conviven dos densidades extremas que, hoy en día, se consideran problemáticas, bien por exceso, bien por defecto. Precisamente de la necesidad de encontrar un equilibrio entre la densidad actual y la que se considera sostenible a nivel económico, social y ambiental, nacen los dos retos urbanísticos de la ciudad actual.

El primero de los desafíos consiste en la implantación de un plan de protección y puesta en valor del casco histórico de la ciudad: *Plan de Sauvegarde et Mise en Valeur* (Figura 1.28). Siempre dentro de un contexto de protección patrimonial tanto a nivel de edificio como de conjunto urbano, el plan plantea la posibilidad de realizar vaciados selectivos para mejorar las condiciones de habitabilidad de los edificios (iluminación, ventilación, accesibilidad...) y su seguridad (incendios). La segunda cuestión urbana que se plantea consiste en cómo dar una respuesta planificada al crecimiento demográfico esperado para las próximas décadas en un territorio ya altamente urbanizado siguiendo un modelo de ocupación disperso. En este contexto, marcado por el elevado precio y la escasez de suelo, la congestión circulatoria y la pérdida de vitalidad urbana de esta zona, se planteó llevar a cabo una revisión del *Plan Local d'Urbanisme* de Anglet, dirigida por Frédéric Bonnet. En ella se apuesta por una estrategia de "urbanización contrastada", en la que se combinen acciones de densificación edificatoria, concentrada fundamentalmente en torno al eje urbano que une las poblaciones de Bayonne–Anglet–Biarritz, con actuaciones de protección, recualificación y ampliación de los espacios verdes (Paquot 2013).

En ambas líneas de actuación, existe un interés por la materialización formal a escala arquitectónica, pero partiendo de un análisis a escala de tejido. En este sentido, los criterios energéticos deberían constituir uno de los argumento de proyecto, partiendo del estudio específico de la morfología.

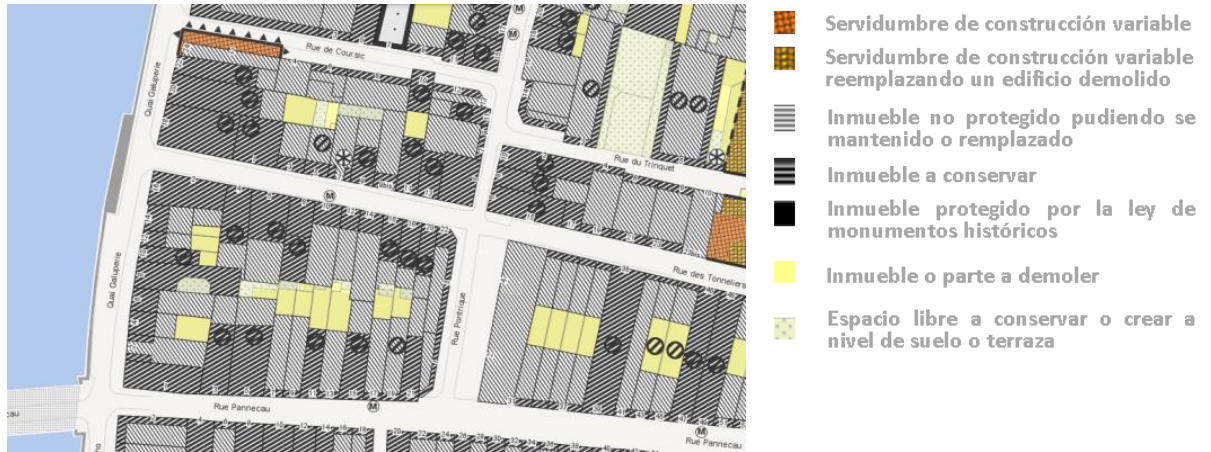


Figura 1. 28. Extracto de actuaciones del Plan de Sauvegarde del Petit Bayonne (Mairie de Bayonne).

Como caso de estudio representativo del casco histórico de Bayona, se seleccionó la Rue des Tonneliers, cañón urbano en el que están presentes las principales características de esta trama: sección transversal con una baja relación W/H, formada por edificaciones de varias plantas con una altura variable, con una reflectancia de las fachadas y un acristalamiento medios (Figura 1. 29).

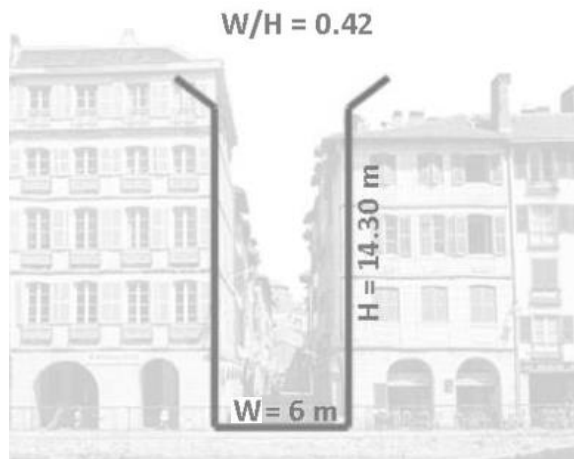


Figura 1. 29. Sección transversal promedio de la Rue des Tonneliers de Bayonne

1.7 CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO

Durante más de un siglo, gobernantes, economistas, sociólogos y urbanistas han discutido sobre la sostenibilidad del modelo compacto frente al disperso, desde diversos puntos de vista. Desde hace algunas décadas, la balanza se ha inclinado por el modelo compacto, apoyándose principalmente en su menor consumo de suelo, ante la debilidad o poca claridad de otro tipo de argumentos de tipo social, económico y también energético. Como se ha mostrado en este capítulo, parte de la problemática a la hora de evaluar el grado de sostenibilidad de la ciudad compacta nace de las dificultades encontradas para definir el concepto de ciudad compacta. A este respecto, ni las aproximaciones cualitativas, basadas en la ausencia/presencia de una serie de características, ni las cuantitativas, apoyadas en indicadores numéricos (ej. densidades), han podido proporcionar una definición clara e unívoca de ciudad compacta, limitando con ello la evaluación de su sostenibilidad.

En este capítulo, se ha mostrado que existen ciertas contradicciones entre las conclusiones de los trabajos realizados hasta el momento sobre la relación entre la forma de la ciudad y su comportamiento energético. En el caso de tramas compactas, se ha observado que los estudios sobre demanda energética de climatización a escala de tejido son poco concluyentes, especialmente en climas con necesidades de calefacción y refrigeración. Esta situación refleja nuestra dificultad de comprender los complejos intercambios energéticos que tienen lugar a la escala de tejido urbano, lo que afecta especialmente a los fenómenos radiativos en ondas cortas y largas. Se subraya así el interés de estudiar el problema térmico a una escala menor, a nivel de calle, donde sea posible visualizar la influencia de las características materiales y formales del cañón sobre el comportamiento térmico de sus superficies, con el objeto de generar conclusiones extrapolables a escala de tejido.

En la parte final del capítulo, se han expuesto dos ejemplos de densificación urbana que dieron lugar a tejidos con una morfología muy compacta (la altura de las calles duplica su anchura), con unas características materiales muy diferenciadas: uno en Córdoba (37.9° N), otro Bayona (43.5° N). Los cascos históricos de estas ciudades resultan interesantes por dos motivos. En primer lugar, pueden considerarse representativos de los tejidos preindustriales de diversas zonas de Europa. Y, en segundo lugar, porque sobre ambos tejidos existe un interés por parte de las instituciones públicas de realizar intervenciones urbanas enfocadas a mejorar sus condiciones ambientales y de habitabilidad. Dentro de estos tejidos urbanos, se han seleccionado varios cañones que serán analizados térmicamente para dar respuesta a los objetivos planteados en la tesis (*Capítulos 4 y 5*).

TERMOGRAFÍA EN AMBIENTE URBANO

2.1 INTRODUCCIÓN

2.2 BALANCE DE ENERGÍA SUPERFICIAL

2.3 PRINCIPIOS FÍSICOS DE LA TERMOGRAFÍA

**2.4 ESTADO DEL ARTE DE LA TERMOGRAFÍA EN
AMBIENTE URBANO**

**2.5 LA PERSPECTIVA EN LA TERMOGRAFÍA Y SUS
IMPLICACIONES**

2.6 LA VARIABILIDAD ANGULAR DE LA EMISIVIDAD

2.7 CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO

2.1 INTRODUCCIÓN

"The interaction of solar, atmospheric, and terrestrial radiation at the earth's surface without any complicating anthropogenic factors is itself a very complex phenomenon. Add the man-made changes and it becomes a formidable problem" (Landsberg 1981).

Para entender cómo un determinado contexto urbano es capaz de generar unas condiciones microclimáticas propias, diferenciadas de las del entorno rural más próximo, es necesario partir del análisis de los cambios que se producen en el balance energético de las superficies.

En cualquier sistema (ej. Ciudad-Atmósfera), dado que ha de cumplirse la Primera Ley de la Termodinámica, existen dos opciones desde el punto de vista de los flujos de energía que en él intervienen:

- Energía entrante = Energía saliente
- Energía entrante = Energía saliente + Cambio en energía del sistema

En la primera opción, la cantidad de energía del sistema no cambia. Sin embargo, eso no significa que, durante el proceso, dicha energía mantenga la misma forma. Para la mayoría de sistemas de la naturaleza, esto sólo ocurre para períodos largos de tiempo (ej. un año). En fracciones de tiempo menores, los sistemas se comportan según la segunda opción (Oke 1978). En este caso, sí existe un cambio en la energía acumulada en el sistema (incremento o disminución), que probablemente se traducirá en un cambio en la temperatura del cuerpo (aumento o descenso).

En esta tesis, nos interesaremos por los fenómenos energéticos que tienen lugar en ambiente urbano en ciclos temporales que van de unos minutos a un ciclo diario completo. Por tanto, estudiaremos no sólo la energía que entra y sale de una superficie, sino la que se almacena en ellas, y su repercusión sobre las temperaturas urbanas.

En este capítulo, se partirá, precisamente, de la ecuación básica que describe los intercambios de energía que tienen lugar sobre una superficie ideal (en inglés: *Surface Energy Balance o SEB*), puntualizando cómo dichos flujos se ven modificados en ambientes urbanos compactos (*epígrafe 2.2*). A continuación, se detallarán los principios físicos que rigen la técnica de la termografía, como metodología indirecta de cuantificación de la temperatura superficial, resultado último de su balance energético (*epígrafe 2.3*). Posteriormente, se realizará una revisión bibliográfica sobre el empleo de la tecnología infrarroja en ambientes construidos (*epígrafe 2.4*). En el siguiente apartado, señalaremos el interés de la *perspectiva termográfica* como medio para analizar térmicamente los entornos urbanos compactos (*epígrafe 2.5*). Finalmente, se tratará una de las limitaciones del enfoque tangencial, la variabilidad de la emisividad según el ángulo de observación, a través de dos casos de estudio, uno en entorno de laboratorio, otro en un entorno real (*epígrafe 2.6*).

2.2 BALANCE DE ENERGÍA SUPERFICIAL

Para el estudio de los flujos de energía que intercambia un cuerpo con su ambiente, partiremos de la ecuación de balance de energía superficial o ecuación *SEB (Surface Energy Balance)*, que, en el caso de una superficie horizontal sin obstrucciones, podemos expresar como (Ec. 2.1):

$$R^* = \pm Q_E \pm Q_H \pm \Delta Q_S \quad (\text{Ec. 2.1})$$

R^* = balance neto de radiación (W/m^2);
 Q_H = flujo de calor sensible emitido hacia la atmósfera (W/m^2);
 Q_E = flujo de calor latente emitido hacia la atmósfera (W/m^2);
 ΔQ_S = calor almacenado (W/m^2).

Tras la aparente simplicidad de esta ecuación, se esconde una gran complejidad atribuible a diversos factores (Oke 1978). En primer lugar, existe una dificultad para definir los **límites reales del sistema** al que se refiere la ecuación, y con ello también sus condiciones límite. En segundo lugar, la anterior expresión engloba varios **procesos energéticos simultáneos en tiempo y espacio**, en los que la energía se presenta en varias formas y cambia de una a otra por diferentes modos (Tabla 2. 1). Pensemos por ejemplo en una fachada que recibe radiación solar (energía radiante). Su capa superficial comenzará a calentarse (aumenta su energía térmica) y con ello la cantidad de energía reemitida (radiación en ondas largas), transfiriendo parte de esta energía a otras partículas más internas (conducción) y parte al aire en contacto con la superficie (convección). Finalmente, la complejidad de la Ec.2.1 también se relaciona con la **variabilidad de los ambientes urbanos**, en los que no sólo existen aspectos relativamente estáticos como la morfología y la materialidad de los edificios, sino otros menos predecibles como aquellos relacionados con el comportamiento humano (Landsberg 1981). En este epígrafe, describiremos cada uno de los términos incluidos en la ecuación, centrándonos en el caso de las tramas urbanas compactas, tema central de la tesis.

<table style="border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="padding-right: 10px;">Formas de energía</td> <td style="border-left: 1px solid black; padding-left: 10px;"> Térmica Radiante Potencial Cinética </td> </tr> </table>	Formas de energía	Térmica Radiante Potencial Cinética	<table style="border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="padding-right: 10px;">Modos de intercambio</td> <td style="border-left: 1px solid black; padding-left: 10px;"> Conducción Convección Radiación </td> </tr> </table>	Modos de intercambio	Conducción Convección Radiación
Formas de energía	Térmica Radiante Potencial Cinética				
Modos de intercambio	Conducción Convección Radiación				

Tabla 2. 1. Formas de energía y modos de intercambio en el sistema Tierra - Aire

2.2.1 Flujo de calor latente, Q_E (Ec. 2.2)

El flujo de calor latente es el calor transferido a la atmósfera como resultado de los procesos de evapotranspiración del agua contenida en las superficies húmedas y plantas. La magnitud de este flujo dependerá de la cantidad de agua evaporada (E) y del calor de vaporización de la misma (L_V):

$$Q_E = L_V \cdot E \quad (\text{Ec. 2.2})$$

Q_E =el flujo de calor latente (W/m^2);
 L_V = el calor latente de vaporización, es decir, la cantidad de calor necesaria para evaporar un kg de agua (0.675kWh a 30°C y 100kPa);
 E = Cantidad de agua evaporada (Kg);

Para el cálculo del flujo de calor latente, se distinguen entre superficies **impermeables** (edificios, carreteras, aparcamientos... que podrán estar secos o saturados después de llover o regarse) y **permeables** (campos, parques, jardines... diferenciando entre superficies irrigadas, es decir, constantemente saturadas, y no irrigadas, que varían de secas a saturadas).

En ambientes urbanos compactos, especialmente hablando a escala del cañón urbano, la mayor parte de las superficies son **impermeables** (Oke 1978), por lo que la existencia de este flujo estará ligada, casi exclusivamente, a la presencia de lluvia y a los riegos puntuales por parte de los servicios municipales de limpieza. Dado que en esta tesis nos centraremos en la situación de día despejado, los flujos de calor latente no serán tenidos en cuenta. No obstante, cabe decir que en otros contextos (ej. plazas con superficies de césped) puede ser relevante, tal como se indica en (Oke 1978; Oke et al. 2017; Erell et al. 2011).

2.2.2 Flujo de calor sensible, Q_H (Ec. 2.3)

El flujo de calor sensible, Q_H , es la cantidad de energía intercambiada entre una superficie y el aire en contacto con la misma por convección, por el hecho de existir una diferencia de temperatura entre ellos. La magnitud de este flujo será directamente proporcional a dicho diferencial de temperaturas ($T_S - T_A$), e inversamente proporcional a la resistencia térmica superficial del material ($R_T = 1/h_c$):

$$Q_H = [T_S - T_A]/R_T = h_c \cdot [T_S - T_A] \quad (\text{Ec. 2.3})$$

Q_H es flujo de calor sensible (W/m^2);

T_S = temperatura superficial (K);

T_A = temperatura seca del aire (K);

R_T = coef. de resistencia térmica superficial por convección ($K \cdot m^2/W$);

h_c = coef. de intercambio de calor por convección ($W/K \cdot m^2$).

Tanto T_S como T_A pueden ser determinadas a partir de mediciones directas. Sin embargo, para fijar el valor h_c , un parámetro dependiente de numerosos factores imposible de obtener analíticamente, es necesario recurrir a ciertas correlaciones experimentales¹. Según Palyvos (2008), existen cuatro enfoques para definir el valor de h_c :

- fijar un valor constante obtenido experimentalmente;
- emplear una expresión sencilla en función de la velocidad del viento;
- utilizar una expresión que incorpore, además de la velocidad del viento, las dimensiones de la superficie analizada (ej. número de Reynolds, Nusselt);
- ídem. que el anterior pero teniendo además en cuenta la dirección del viento con respecto a la superficie.

¹ 1 En la modelización de h_c se identifican hasta 9 factores influyentes (Mirsadeghi et al. 2013): velocidad del viento, dirección del viento en relación a la orientación de la superficie (wind attack angle), orientación de la superficie en relación al viento en términos cualitativos (barlovento, sotavento), inclinación de la superficie en relación al plano horizontal, tipo de terreno, grado de resguardo por el entorno, textura de la superficie, diferencia de temperatura aire-superficie, tamaño de la superficie y relación de aspecto de la misma. Además, también influye el tipo y la geometría del edificio, factores que los modelos no consideran.

La velocidad y la dirección del viento, por tanto, resultan clave a la hora de determinar el valor de h_c y, con ello, de Q_H . Dado que ambos toman valores muy diferentes en función del punto de medición (altura respecto al suelo, distancia a las superficies, etc) y el momento de la misma (rachas de viento, turbulencias, etc), la robustez de estas formulaciones ha de ponerse en cuestión en el caso de ambientes urbanos (Erell et al. 2011; Muneer et al. 2000; Oke et al. 2017). Además, ha de tenerse en cuenta la existencia de *efectos de arista* en el coeficiente térmico de las superficies, es decir, diferencias entre la parte central de las paredes y su borde (especialmente en la arista superior). Este aspecto, por ejemplo, no puede ser tenido en cuenta fácilmente en los cálculos nodales, pero sí en métodos basados en elementos finitos.

Un factor a tener en cuenta es que los movimientos de convección pueden originarse a varias escalas. A nivel territorial, los llamamos vientos y constituyen una condición meteorológica de contorno. Sin embargo, el mismo fenómeno también puede producirse localmente por simple flotabilidad de aires a distinta temperatura (densidad), pudiendo ser incluso forzado mediante estrategias arquitectónicas donde se generen diferenciales de temperatura superficial (ej. chimenea solar). La inclusión de este fenómeno en la determinación de h_c requiere, no obstante, cálculos avanzados que implican procesos iterativos para el cálculo de temperaturas superficiales.

En contextos urbanos densos, las velocidades del viento tienden a reducirse considerablemente con respecto a ambientes más expuestos. En el caso concreto del cañón urbano, se han encontrado una ciertas correlaciones entre la velocidad del viento a nivel de cubierta y en su interior, cuando la dirección de este es paralela al eje de la calle (Santamouris et al. 1999). Cuando la dirección es perpendicular, el flujo se vuelve más turbulento, con *vortex* de diferente velocidad según la altura.

En definitiva, vemos que el valor de este flujo Q_H depende de parámetros que pueden variar notablemente a nivel local. La temperatura superficial T_s y, sobre todo, el valor del coeficiente de convección h_c constituyen puntos críticos en este sentido, por la notable variación espacial que pueden presentar.

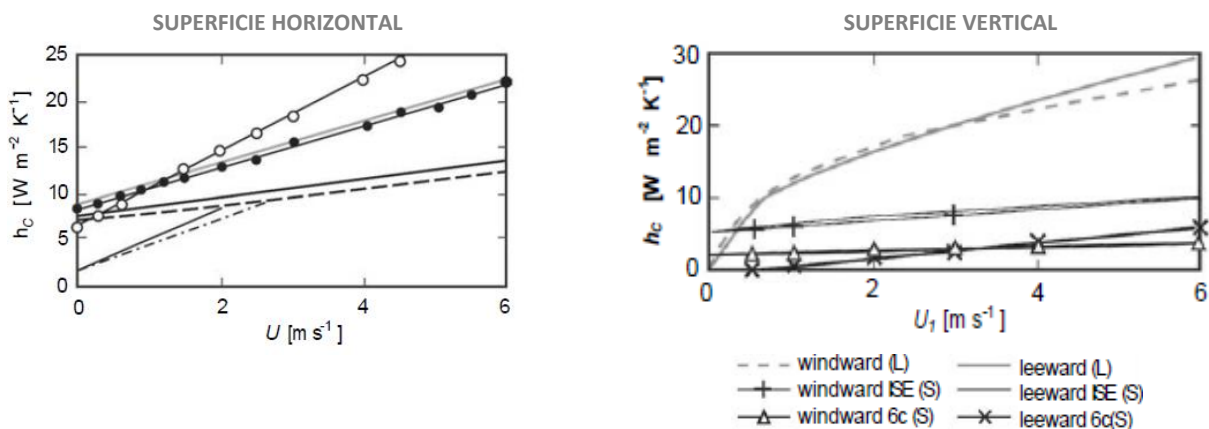


Figura 2. 1. Coeficientes de convección exterior en superficies horizontales y verticales según V_{viento} (Erell et al. 2011).

2.2.3 Calor almacenado ΔQ_s

La cantidad de calor almacenado, ΔQ_s , ha demostrado ser un término con un peso relevante dentro de la SEB (Grimmond et al. 1991). En una superficie plana, el ΔQ_s depende de la capacidad de los materiales para transferir y almacenar calor, descritas a través de cuatro propiedades:

- *Conductividad térmica* k (W/mK) o la capacidad de conducir el calor entre sus moléculas al existir un diferencial de temperatura.
- *Capacidad calorífica* C (J/m³K) o la capacidad de almacenar el calor, calculada como el producto de la *densidad del material* ρ (kg/m³) por su *calor específico* c (J/kg K): $C = c \rho$.
- *Difusividad térmica* d (m²/s), describe la velocidad con la que la onda térmica viaja a través del material, que será directamente proporcional a la conductividad térmica e inversamente proporcional a la capacidad calorífica: $d = k/C$.
- *Admitancia o efusividad térmica* μ o *inercia* (J/m²Ks^{1/2}) es una propiedad que se deriva de la siguiente relación entre conductividad térmica y capacidad calorífica: $\mu = \sqrt{kC}$. Mucho menos intuitiva que las anteriores, es, sin embargo, la propiedad más influyente sobre el clima urbano (Oke et al. 2017). Así, superficies con μ alta almacenarán mucho calor y presentarán cambios diarios relativamente pequeños en la temperatura superficial. En cambio, con baja μ , almacenarán calor con menos facilidad y la amplitud de la temperatura superficial será mayor, arrojando grandes cantidades de calor sensible a la atmósfera (Q_H). En la Figura 2. 2, se proporcionan valores de referencia de este parámetro para materiales rurales y urbanos. En ella se muestra que esta propiedad puede variar en el tiempo en función del contenido en agua del material².

Aunque la medición del ΔQ_s en un punto concreto de una superficie no plantea ninguna dificultad técnica (ej. *flux plates*), la obtención de valores representativos para un área urbana resulta mucho más compleja (Erell et al. 2011). Por ello, en numerosos estudios de clima urbano, ΔQ_s se obtiene como el término residual de la ecuación de balance, conocidos Q^* , Q_E y Q_H .

De manera general, en la cantidad de calor almacenado en ambientes urbanos, influirán, no sólo las propiedades térmicas de los materiales de construcción, sino también la cantidad de agua contenida en el sistema y la configuración geométrica del mismo. Específicamente en el caso de **tramas compactas**, donde la cantidad de agua almacenada suele ser pequeña ($Q_E = 0$), la cantidad de calor almacenada ΔQ_s dependerá de la relación entre el balance neto radiativo Q^* y los flujos de calor sensible Q_H . A lo largo del tiempo, y con el avance de la climatología urbana, esta relación ha sido modelizada de distinta forma. Inicialmente, se propusieron modelos donde ΔQ_s se parametrizaba en base a una relación lineal con el balance neto radiativo (Oke et al. 1981), pudiendo alcanzar la mitad del flujo de radiación neta diaria (Erell et al. 2011). Investigaciones posteriores mostraron, sin embargo, que una relación de histéresis entre ambas variables era capaz de describir mejor el almacenamiento de energía de la superficies (Grimmond et al. 1991; Oke et al. 2017), como se muestra en la Figura 2. 3.

² Tradicionalmente, las diferencias de admitancia térmica entre ciudad y campo se señala como una de las causas del fenómeno de Isla de Calor. En situaciones típicas de suelos con humedad intermedia, los valores de admitancia de las superficies rurales y urbanas son similares (entre 1200 y 1600 J/m²Ks^{1/2}).

Material	State	Heat capacity C (MJ m ⁻³ K ⁻¹)	Thermal conductivity k (W m ⁻¹ K ⁻¹)	Thermal diffusivity α (m ² s ⁻¹ × 10 ⁻⁶)	Thermal admittance μ_s (J m ⁻² s ^{-1/2} K ⁻¹)
Natural materials (rural and undeveloped urban sites)					
Sandy soil (40% porosity)	Dry	1.28	0.3	0.24	620
	Saturated	2.96	2.2	0.74	2,550
Clay soil (40% porosity)	Dry	1.42	0.25	0.18	600
	Saturated	3.10	1.58	0.51	2,210
Peat soil (80% porosity)	Dry	0.58	0.06	0.10	190
	Saturated	4.02	0.5	0.12	1,420
Snow	Fresh	0.21	0.08	0.10	130
	Old	0.84	0.42	0.40	595
Ice	0 °C, pure	1.93	2.24	1.16	2,080
Water ¹	4 °C, still	4.18	0.57	0.14	1,545
Air ¹	10 °C, still	0.0012	0.025	21.5	5
	Turbulent	0.0012	~125	~10 × 10 ⁶	390
Construction and building materials in dry state (built sites)					
Asphalt road	Range	1.92–2.10	0.74–1.40	0.38–1.04	1,205–1,960
	Typical	1.94	0.75	0.38	1,205
Concrete	Aerated	0.28	0.08	0.29	150
	Dense	2.11	1.51	0.72	1,785
Stone	Typical	2.25	2.19	0.97	2,220
Brick	Typical	1.37	0.83	0.61	1,065
Adobe		1.50	0.57	0.38	922
Clay tiles		1.77	0.84	0.47	1,220
Stone ballast	40% void	1.30	0.86	0.66	1,058
Wood	Light	0.45	0.09	0.20	200
	Dense	1.52	0.19	0.13	535
Steel		3.93	53.3	13.6	14,475
Glass		1.66	0.74	0.44	1,110
Plaster	Gypsum	1.40	0.46	0.33	795
Gypsum board	Typical	1.49	0.27	0.18	635
Insulation	Polystyrene	0.02	0.03	1.50	25
	Cork	0.29	0.05	0.17	120

Figura 2. 2. Propiedades térmicas de materiales naturales de entornos rurales y de materiales de la construcción de entornos urbanos (Oke et al. 2017).

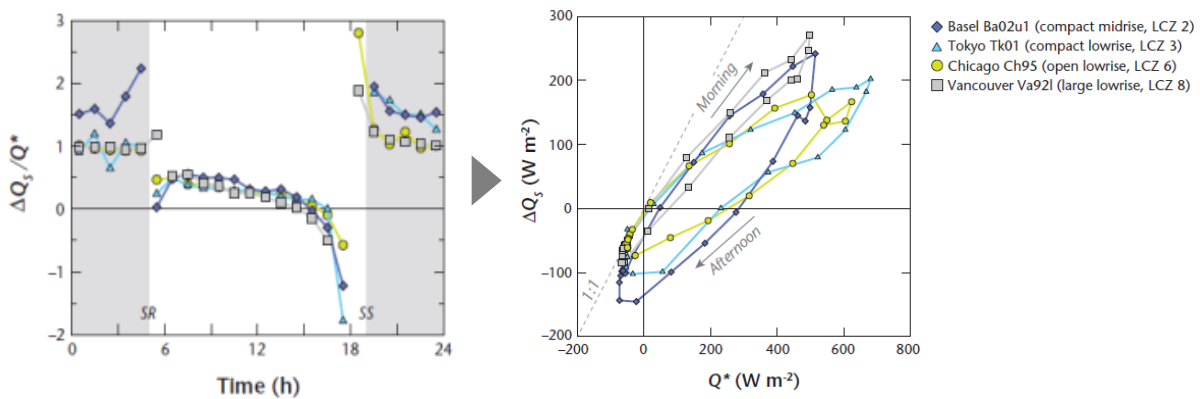


Figura 2. 3. Variación del calor almacenado ΔQ_s normalizado por la el Balance Radiativo Neto Q^* en el ciclo de histéresis entre ambas variables para cuatro configuraciones urbanas (Oke et al. 2017).

2.2.4 Balance neto de radiación, Q* (Ec. 2.4)

Cuando sobre un cuerpo incide radiación, ésta puede ser absorbida, reflejada o transmitida. La proporción en la que cada fenómeno ocurre se expresa a través de los coeficientes de absorción (α), transmisión (T) y reflexión (r). Dado que el valor de α , T y r depende de la longitud de onda analizada y que el principio de conservación de la energía ha de cumplirse, se obtiene que (Ec. 2.4):

$$\alpha_{\lambda} + T_{\lambda} + r_{\lambda} = 1 \quad (\text{Ec. 2.4})$$

α_{λ} = coeficiente de absorción de la radiación según λ
 T_{λ} = coeficiente de transmisión de la radiación según λ
 r_{λ} = coeficiente de reflexión de la radiación según λ

Como consecuencia, los materiales pueden presentar comportamientos diferentes en función de la longitud de onda, exhibiendo incluso comportamientos altamente selectivos (ej. vidrio, vegetación). Para calcular el balance energético de una superficie contruida, resulta poco operativo trabajar con el comportamiento espectral de los materiales (ej. globalmente, importa cuánta energía se absorbe y no cuál era su longitud de onda inicial). Por ello, en aplicaciones habituales, se trabaja con coeficientes que describen el comportamiento promedio dentro de un rango de longitudes de onda, distinguiendo generalmente entre ondas cortas y ondas largas. Específicamente para el comportamiento infrarrojo, como demuestra la ley de Kirchoff, lo que absorbe un cuerpo, expresado mediante el coeficiente α , será igual a lo que emita, es decir, su emisividad ϵ .

El flujo neto por radiación (Q^*) de la ecuación SEB, se calcula como balance entre radiación de ondas cortas (ΔSW , *Short Wave Radiation*), y la de ondas largas (ΔLW , *Long Wave Radiation*). Para una **superficie sin obstrucciones**, como cubiertas planas en lugares elevados y otras superficies horizontales sin relieve, donde los intercambios radiativos ocurren exclusivamente entre el cielo y la superficie, este balance se expresa como (Ec. 2.5):

$$Q^* = \Delta SW + \Delta LW = [SW_{\downarrow} - SW_{\uparrow}] + [LW_{s\downarrow} - LW_{\uparrow}] = (1-r) \cdot SW_{\downarrow} + LW_{s\downarrow} - [(1-\epsilon) \cdot LW_{s\downarrow} + \epsilon \sigma T_s^4] = \alpha (I_s + I_b) + \epsilon (LW_{s\downarrow} - \sigma T_s^4) \quad (\text{Ec. 2.5})$$

$\Delta SW / \Delta LW$ = balance de radiación en ondas cortas /largas;
 SW_{\downarrow} = radiación incidente en ondas cortas (W/m^2);
 SW_{\uparrow} = radiación reflejada en ondas cortas (W/m^2);
 $LW_{s\downarrow}$ = radiación recibida del cielo en ondas largas (W/m^2);
 LW_{\uparrow} = rad. emitida por la superficie en ondas largas (W/m^2);
 I_b / I_s = irradiancia solar directa / difusa del cielo (W/m^2);
 T_s = Temperatura superficial (K)

El balance en ondas cortas dependerá de la radiación solar incidente sobre la superficie, suma de la contribución directa del sol (I_b) y difusa del cielo (I_s), y de su coeficiente de reflexión ($r=1-\alpha$). Mientras que el de ondas largas (ΔLW) dependerá tanto de la radiación en ondas largas recibida del cielo ($LW_{s\downarrow}$), como de la temperatura (T_s) y la emisividad de la superficie (ϵ).

En definitiva, el balance radiativo global de una superficie sin obstrucciones está condicionado simultáneamente por las características de la misma (α_s , ϵ_s y T_s) y por factores climáticos (I_b , I_s , $LW_{s\downarrow}$).

En una superficie con obstrucciones, como sería el caso de una gran parte de las superficies urbanas, los intercambios radiativos se ven modificados de la siguiente forma (Ec.2.6):

$$Q^* = \Delta SW + \Delta LW =$$

$$Q^* = [SW_{\downarrow} - SW_{\uparrow}] + [LW_{s\downarrow} - LW_{\uparrow}] =$$

$$Q^* = (1-r) \cdot SW_{\downarrow} + LW_{s\downarrow} - [(1-\epsilon) \cdot LW_{s\downarrow} + \epsilon \sigma T_s^4] =$$

$$Q^* = \alpha (I_s + I_b + I_r) + \epsilon (LW_{s\downarrow} + LW_{e\downarrow} - \sigma T_s^4)$$

(Ec. 2.6)

$\Delta SW / \Delta LW$ = balance de radiación en ondas cortas /largas;

SW_{\downarrow} = rad. incidente en ondas cortas (W/m^2);

SW_{\uparrow} = rad. reflejada en ondas cortas (W/m^2);

$LW_{s\downarrow}$ = rad. recibida del cielo en ondas largas (W/m^2);

$LW_{e\downarrow}$ = rad. recibida del entorno en ondas largas (W/m^2);

LW_{\uparrow} = rad. emitida por la sup. en ondas largas (W/m^2);

I_b / I_s = irradiancia solar directa / difusa del cielo (W/m^2);

I_r = irradiancia reflejada del entorno (W/m^2);

T_s = Temperatura superficial (K)

Sobre el balance en ondas cortas (ΔSW), las obstrucciones generan dos efectos contrapuestos. Por un lado, la radiación incidente llegando directamente del sol (I_b) y de forma difusa de la bóveda celeste (I_s), disminuye a consecuencia del sombreado entre los volúmenes y de una menor visión de la bóveda celeste.

Por otro, se produce un aumento de la radiación incidente gracias a la aportación de la componente reflejada (I_r) (Figura 2. 4). El entorno se convierte así en una “fuente secundaria” de radiación de importancia variable según su coeficiente de reflexión, con una distribución difusa o especular (o una combinación de ambas). Esta descripción es particularmente relevante para las ciudades de latitudes medias, y tiene un efecto algo reducido en las ciudades ecuatoriales, donde la elevación solar del mediodía es mayor (Pearlmutter et al. 1999; Erell et al. 2011).



Figura 2. 4 Radiación reflejada sobre fachada. Fotografía tomada por V. Olgyay En: (Lam 1986)

La presencia de obstrucciones también altera el balance en ondas largas (ΔLW). En este caso, la radiación en ondas largas recibida sobre la superficie analizada proviene tanto del cielo como del resto de superficies de su entorno (más calientes que el cielo, sobre todo si está despejado). La magnitud de dichos flujos estará condicionada, por un lado, por la cantidad de radiación emitida por las superficies según la *Ley de Stefan Boltzmann* (es decir, por su emisividad y la cuarta potencia de su temperatura). Y, por otro, por la cantidad de cielo/entorno visible desde la superficie de análisis y por la posición relativa entre ambas superficies. La combinación de ambos factores explica que en entornos compactos -donde la visión del cielo es reducida-, las posibilidades de enfriamiento radiativo sean más limitadas, una de las causas del fenómeno de isla de calor (Oke 1978).

En definitiva, el balance radiativo de una superficie urbana con obstrucciones dependerá tanto de las propiedades intrínsecas de la superficie y del clima que la rodea, como de aspectos extrínsecos a la superficie, como las características materiales y geométricas del entorno.

En el caso de entornos compactos donde las calles tienen relaciones de aspecto W/H bajas, la magnitud de las reflexiones, tanto en ondas cortas como en ondas largas, será un aspecto que cobrará gran importancia. En (Harman 2004) se investigó la variación de los flujos de radiación SW y LW sobre las paredes del cañón urbano en función de la precisión en el cálculo de las reflexiones, comparando tres escenarios: un cálculo que ignora las reflexiones, que considera solamente una o que halla la solución exacta al problema de las multi-reflexiones. Harman mostró que la solución exacta varía significativamente de las dos aproximaciones cuando la reflectividad del material de la superficie es mayor a 0.2 o la emisividad es menor a 0.8, sobre todo en cañones profundos (proporción H/W <1). Es importante recalcar que los valores “críticos” de emisividad y reflectividad proporcionados por (Harman 2004), a partir de los cuales es necesario considerar las multi-reflexiones, están dentro de los rangos habituales exhibidos por los materiales de construcción (ej. en hormigón, $\epsilon \approx 0.7-0.9$ y ladrillo $\alpha \approx 0.2-0.4$).

[Ecuación de Balance Superficial y Temperatura superficial]

El resultado del balance de energía en un punto se traduce físicamente en cambios en su temperatura superficial (balance positivo, aumento de temperatura y viceversa). Asimismo, conocida la evolución de temperaturas en un punto, es posible obtener información de otros términos de la ecuación de balance energético, como la magnitud de ciertos flujos de energía que tienen lugar sobre la superficie o información sobre las propiedades materiales de la superficie. (Ej. deducción sobre la gran inercia de un material, al observar que su temperatura tarda mucho en descender después de haber estado expuesto al sol).

En ambiente urbano, el estudio de las temperaturas superficiales puede contribuir a mejorar nuestro conocimiento sobre los procesos energéticos y las características materiales de dicho entorno. Dado que este balance varía dentro de una misma superficie, los cuerpos mostrarán gradientes de temperatura, que pueden ser estudiados mediante termografía infrarroja, tecnología de medición cuyos principios, aplicaciones y limitaciones se describirán en sucesivos epígrafes.

2.3 PRINCIPIOS FÍSICOS DE LA TERMOGRAFÍA

Los equipos de termografía infrarroja (en inglés: *Infrared Thermography* o IRT) proporcionan información sobre la temperatura superficial de los objetos. No obstante, es importante recordar que estos instrumentos no miden directamente temperatura, sino radiación infrarroja dentro un rango de longitud de onda determinado³. Los valores de energía detectada por el sensor ($\text{W}/\text{cm}^2\text{sr}$) son convertidos en valores de temperatura mediante un algoritmo incorporado en el dispositivo basado en la *Ley de Stefan Boltzmann*.

De la radiación recibida por el sensor, no toda proviene de la superficie de estudio. Este hecho puede llevar a errores de precisión en la medición de la temperatura de dicha superficie. Por ello, antes de realizar la conversión radiación-temperatura, la fracción de radiación proveniente de otras fuentes (como el entorno circundante o la atmósfera) debe ser eliminada mediante un procedimiento de *compensación* (Usamentiaga et al. 2014).

El total de la energía radiante que llega al sensor (ϕ_{TOT}) es, en realidad, la suma de tres componentes (Ec. 2.7): la radiación emitida por el objeto de estudio ϕ_{OBJ} , la radiación reflejada por dicho objeto proveniente de su entorno ϕ_{REF} y la radiación emitida por la atmósfera ϕ_{ATM} .

$$\phi_{\text{TOT}} = \phi_{\text{OBJ}} + \phi_{\text{REF}} + \phi_{\text{ATM}} \quad [\text{W}/\text{m}^2] \quad (\text{Ec. 2.7})$$

Así pues, el origen de los flujos de la radiación infrarroja detectados por el sensor podría esquematizarse como se muestra en la Figura 2. 5.

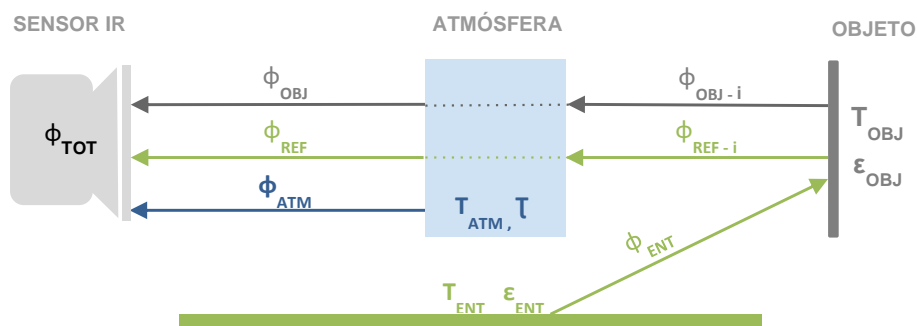


Figura 2. 5. Componentes simplificados de la radiación infrarroja medida por la cámara.

³ Para imágenes IR, solo se usa un pequeño rango del espectro IR. Por lo general, se definen tres rangos espectrales para la termografía: la región de onda larga (LW) de alrededor de 7 a 14 μm , la región de la onda media (MW) aproximadamente entre 3 y 5 μm y la onda corta (SW), región entre 0.9 a 1.7 μm (Vollmer & Möllmann 2010). Aunque Hay cámaras comerciales disponibles para estos tres rangos, las cámaras que se emplean en edificación suelen operar en la banda de 7 a 14 μm debido a que la atmósfera es más transparente a la transmisión de ondas de esta longitud (Fundación de la Energía de la Comunidad de Madrid 2011).

La **primera componente** de la energía recibida por el sensor tiene su origen en la radiación infrarroja emitida por el propio **objeto de estudio**. Dicho elemento, cuyo comportamiento radiativo aproximaremos al de un cuerpo gris opaco, emite un flujo radiante ϕ_{OBJ} , que es función de la emisividad del objeto ϵ_{OBJ} y de la cuarta potencia de su temperatura T_{OBJ} :

$$\phi_{OBJ} = \epsilon_{OBJ} \sigma (T_{OBJ})^4 \quad (\text{Ec. 2.8})$$

De los fotones emitidos inicialmente por el objeto (Ec. 2.8), sólo una parte acabará llegando al detector, ya que parte de ellos son absorbidos por la porción de atmósfera existente entre ambos. La magnitud de esta “atenuación atmosférica” se tiene en cuenta multiplicando el flujo de la Ec. 2.8, por el factor de transmitancia de la atmósfera τ , cuyo valor dependerá de la distancia sensor-objeto y de la composición del aire (humedad, partículas...).

Así pues, el flujo de radiación proveniente del objeto que finalmente recibe el detector ϕ_{OBJ} valdrá:

$$\phi_{OBJ} = \tau \epsilon_{OBJ} \sigma (T_{OBJ})^4 \quad (\text{Ec. 2.9})$$

La **segunda componente** de la energía radiante detectada por el sensor IR proviene de la radiación emitida por el **entorno del objeto analizado**. En entornos urbanos reales, el entorno puede estar compuesto de superficies de naturaleza muy diversa, con propiedades ópticas heterogéneas (diferentes ϵ) y encontrarse a temperaturas muy distintas. Sin embargo, para simplificar, supondremos que el entorno del objeto estudiado tiene la misma emisividad (ϵ_{ENT}) y se encuentra a una temperatura uniforme (T_{ENT}). En este caso, el entorno emite un flujo radiante ϕ_{ENT} de valor:

$$\phi_{ENT} = \epsilon_{ENT} \sigma (T_{ENT})^4 \quad (\text{Ec. 2.10})$$

De los fotones emitidos por el entorno (Ec. 2.10), una parte llega al objeto de medición y es reflejada hacia el sensor. La magnitud del flujo reflejado ϕ_{REF} es proporcional al coeficiente de reflexión del objeto ($r = 1 - \epsilon_{OBJ}$):

$$\phi_{REF} = (1 - \epsilon_{OBJ}) \epsilon_{ENT} \sigma (T_{ENT})^4 \quad (\text{Ec. 2.11})$$

La intensidad del flujo reflejado (Ec.2.11) se ve igualmente atenuada como consecuencia de la absorción de radiación de la capa de atmósfera que separa el objeto del sensor. Así pues, el flujo radiante que finalmente llega al detector IR proveniente del entorno ϕ_{REF} se expresa de la siguiente manera:

$$\phi_{REF} = \tau (1 - \epsilon_{OBJ}) \epsilon_{ENT} \sigma (T_{ENT})^4 \quad (\text{Ec. 2.12})$$

La **tercera componente** de la radiación infrarroja que incide sobre el sensor IR proviene precisamente de la parte **de la atmósfera** entre el objeto y el detector. Consideraremos que el “aire” se encuentra a una temperatura uniforme T_{ATM} y que es capaz únicamente de transmitir y absorber radiación ($r = 0$). Bajo este supuesto, su emisividad valdrá $\epsilon_{ATM} = (1-\tau)$ y, por tanto, la radiación infrarroja emitida por la atmósfera ϕ_{ATM} será de:

$$\phi_{ATM} = (1-\tau) \sigma (T_{ATM})^4 \tag{Ec. 2.13}$$

Si actualizamos la Figura 2. 5 incorporando el valor detallado de cada uno de los flujos (Ec.2.8 – Ec.2.13), obtenemos una imagen más completa del juego de absorción/emisión/reflexión de radiación infrarroja que interviene en el flujo de radiación que recibe el sensor de los dispositivos de medición por termografía infrarroja (Figura 2. 6):

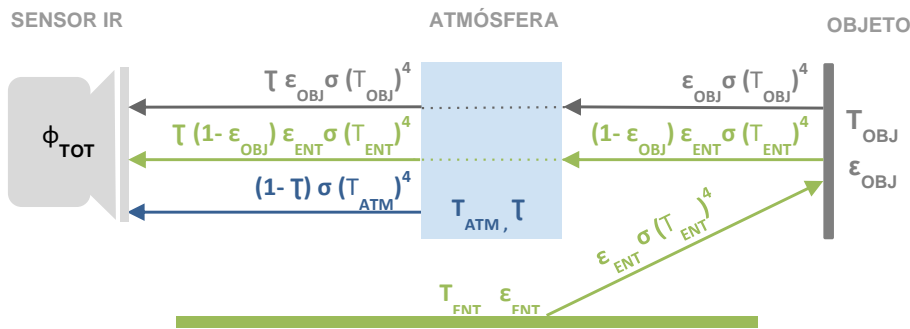


Figura 2. 6. Componentes detallados de la radiación infrarroja medida por la cámara.

Substituyendo las expresiones desarrolladas de ϕ_{OBJ} , ϕ_{ENT} y ϕ_{ATM} (de la Ec.2.9, Ec.2.12 y Ec. 2.13, respectivamente), en la expresión del flujo radiante total captado por el detector ϕ_{TOT} (Ec.2.7), obtendríamos la siguiente ecuación:

$$\phi_{TOT} = \tau \epsilon_{OBJ} \sigma (T_{OBJ})^4 + \tau (1-\epsilon_{OBJ}) \epsilon_{ENT} \sigma (T_{ENT})^4 + (1-\tau) \sigma (T_{ATM})^4 \tag{Ec. 2.14}^4$$

De esta expresión es posible despejar el valor de la temperatura del objeto, T_{OBJ} , incógnita de nuestro problema:

$$T_{OBJ} = \sqrt[4]{\frac{\phi_{TOT} - \tau (1-\epsilon_{OBJ}) \epsilon_{ENT} \sigma (T_{ENT})^4 - (1-\tau) \sigma (T_{ATM})^4}{\tau \epsilon_{OBJ} \sigma}} \tag{Ec. 2.15}$$

⁴ Estrictamente hablando, la Ec. 2.14 representa el flujo radiante espectral, es decir, para una única longitud de onda. Para calcular la señal total recibida por el sensor, esta ecuación debe integrarse en cada longitud de onda para tener en cuenta la dependencia espectral de la respuesta del detector y de la transmisión atmosférica (Vollmer & Möllmann 2010).

Además del flujo radiante ϕ_{TOT} medido por la cámara, para resolver la ecuación anterior, es necesario disponer de información sobre los siguientes parámetros:

- **Transmitancia atmosférica τ :**
La τ es calculada por el software del dispositivo, basándose en el modelo LOWTRAN (Kneizys et al. 1988), a partir la temperatura atmosférica, la humedad relativa y la distancia de medición introducidas por el usuario (Vollmer & Möllmann 2010). Para distancias cortas, τ toma valores muy cercanos a uno. En cambio, al aumentar la distancia (ej. mediciones aéreas o satelitales), su valor disminuye y, con ello, la corrección atmosférica se vuelve crítica a hora de obtener resultados precisos (Voogt & Oke 2003).
- **Temperatura atmosférica T_{ATM} :**
Puede obtenerse empleando un termómetro común. Este parámetro tendrá una influencia limitada en mediciones IR realizadas a corta distancia (está multiplicado por $\epsilon_{ATM} \approx 0$). Por el contrario, T_{ATM} cobrará una mayor relevancia al termografiar objetos más lejanos, ya que la ϵ_{ATM} aumentará.
- **Emisividad del entorno ϵ_{ENT} :**
Cuantificar la ϵ de los diferentes elementos del entorno de medición para obtener un valor de emisividad global " ϵ_{ENT} " resultaría una tarea excesivamente complicada en la práctica habitual de la IRT. Por ello, se supone que el entorno en su conjunto se comporta, bien como un cuerpo negro, es decir, de $\epsilon_{ENT} = 1$; bien como un cuerpo gris, con $\epsilon_{ENT} < 1$. En ambientes construidos, suelen considerarse valores de $\epsilon_{ENT} = 0.9 - 0.95$.
- **Emisividad del objeto ϵ_{OBJ} :**
Es el parámetro de mayor importancia a la hora de calibrar una imagen de IRT (Usamentiaga et al. 2014). La emisividad es una propiedad óptica de la superficie del material, que depende del tipo de material. Por ello, dedicaremos un epígrafe específico a tratar aspectos relevantes de la ϵ_{OBJ} .
- **Temperatura del entorno T_{ENT} :**
También llamada temperatura reflejada, la T_{ENT} es un parámetro que puede ser muy relevante, sobre todo cuando la ϵ_{OBJ} es baja. Su valor se determina in-situ experimentalmente, mediante el método del reflector o bien mediante el método directo (ASTM 1998).

En la práctica de la termografía infrarroja, el usuario deberá introducir en el software de la cámara el valor de **5 de estos parámetros** (emisividad, temperatura reflejada, distancia de medición, temperatura atmosférica y humedad relativa) para calibrar las imágenes (Figura 2. 7).

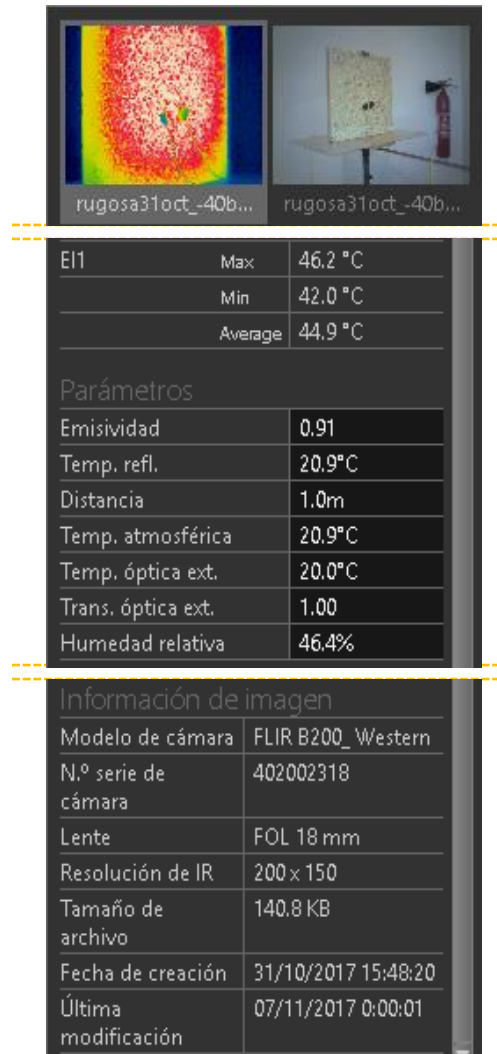


Figura 2. 7. Parámetros a introducir en el software comercial (ej. de Flir Tools)

2.4 ESTADO DEL ARTE DE LA TERMOGRAFÍA EN AMBIENTES URBANOS

La termografía es una técnica que permite la representación gráfica de los patrones superficiales de temperatura deducidos a partir de la medición de radiación infrarroja. Sus orígenes se remontan a 1840, momento en que Sir John Hershel realiza la primera imagen termográfica, apenas 40 años después del descubrimiento del infrarrojo por parte de su padre, Sir William Hershel (Ring 2000). A partir de la invención del *bolómetro* de Langley en 1880, y gracias a la descripción de las leyes de Max Planck en 1900 (Barr 1963), los avances tecnológicos en el campo de la termografía se sucedieron, impulsados en primera instancia por intereses militares. Esta evolución ha permitido una toma de imágenes cada vez más precisas, con una mayor resolución y más rápidas [ahora son prácticamente instantáneas pero hasta los años 50, se tardaba 45 minutos, como recuerda (Holst 2000)]. En paralelo a las mejoras técnicas, se ha producido un descenso de su coste, lo que ha convertido a las cámaras termográficas en una tecnología habitual, multiplicando sus aplicaciones prácticas en el ámbito civil, y de manera particular, en el mundo de la construcción (Kylili et al. 2014).

En este epígrafe, realizaremos una revisión de trabajos en los que se emplea la termografía para aplicaciones relacionadas con la construcción. Es necesario recalcar que el número de referencias sobre este tema es muy numeroso, con una calidad científica variable y proveniente de fuentes muy diversas. Ante esta situación, se ha optado por centrar el análisis de la literatura en publicaciones de tipo académico. Otras fuentes, como los documentos técnicos desarrollados por casas comerciales y publicaciones de tipo divulgativo sobre la temática, serán empleadas únicamente en ciertos aspectos de la discusión.

El presente trabajo puede considerarse como complementario a las publicaciones *Review* realizadas en distintos ámbitos (Balaras & Argiriou 2002; Kylili et al. 2014; Fox et al. 2014; Maldague 2002; Usamentiaga et al. 2014; Weng 2009a). El interés del presente Estado del Arte con respecto a las anteriores *Reviews* es la aportación de una visión estructurada sobre el uso de la termografía en ambientes construidos, desde 7 puntos de vista diferentes:

- El alcance espacial de los estudios termográficos (elemento, edificio, calle, ciudad)
- La temporalización de las medidas (puntual, múltiple o secuencial).
- La técnica de medición termográfica empleada (pasiva, activa pulsada o *lock-in*)
- El procedimiento de adquisición de datos (terrestre, aéreo; manual, automático)
- El enfoque del análisis de los resultados (cualitativo, cuantitativo, mixto)
- La finalidad del estudio (diagnóstico, caracterización, ambiental)
- El estado térmico analizado (estacionario, pseudo-estacionario, transitorio)

En la Figura 2.8 se presenta un extracto del análisis realizado sobre las publicaciones incluidas en la presente revisión bibliográfica. Esta sección concluirá con una serie de reflexiones, surgidas a raíz de la revisión de las referencias estudiadas, sobre las posibilidades del uso de la termografía para una mejor comprensión de la térmica a escala de calle.

PUBLICACIONES ACADÉMICAS	TEMPORALIDAD			ESPACIALIDAD			ADQUISICIÓN				TÉCNICA			ENFOQUE DE ANÁLISIS			FINALIDAD			ESTADO TÉRMICO				
	Puntual	Múltiple	Secuencia	Muestra – Local	Edificio	Calle	Ciudad	Terrestre Manual	Terrestre Autom.	Aérea Semi-Auto.	Aérea Auto.	Pasiva	Activa Pulsada	Activa Lock-in	Cualitativo	Cuantitativo	Mixto	Detec. Irregularidades	Carácter. Material	Ambiental	Estacionario (Lab)	Pseudo-Estacionario	No estacionario	
[1] (Artis & Carnahan 1982)																								
[2] (Grinzato et al. 1998)																								
[3] (Fox et al. 2012)																								
[4] (Fokaides & Kalogirou 2011)																								
[5] (Phan 2012)																								
[6] (Shao 2011)																								
[7] (Doulos et al. 2004)																								
[8] (Lagouarde et al. 2010)																								
[9] (Costanzo et al. 2014)																								
[10] (Lagüela et al. 2012)																								
[11] (González-Aguilera et al. 2012)																								
[12] (González-Aguilera et al. 2013)																								
[13] (De Freitas et al. 2014)																								
[14] (Asano & Hoyano 1996)																								
[15] (Loveday et al. 2017)																								
[16] (Fox et al. 2015)																								
[17] (Weng 2009)																								
[24] (Tamura et al. 2001)																								
[25] (Boiné et al. 2018)																								
[26] (Meier 2011)																								
[27] (Lee et al. 2018)																								
TOTAL	8	6	14	9	8	5	5	20	4	2	1	25	3	2	4	11	12	7	6	14	3	8	19	

Figura 2. 8. Extracto de la matriz de análisis del estado del arte sobre termografía en ambientes construidos.

2.4.1 Alcance espacial de los estudios

Dentro de los ambientes construidos, los estudios basados en la termografía abarcan una amplia escala espacial, que va desde el análisis de elementos de escasos centímetros [ej. una muestra de un material estudiada en laboratorio, como en (Fox et al. 2012), o *in situ*, como en (Doulos et al. 2004)] hasta ciudades enteras [ej. estudios satelitales de temperatura superficial revisados en (Weng 2009)], pudiendo pasar por las escalas intermedias del edificio individual (González-Aguilera et al. 2013; Lagüela et al. 2012) o de la calle (Asano & Hoyano 1996).

La revisión bibliográfica llevada a cabo muestra que la mayor parte de los estudios, se centran en las dos escalas extremas (local y de ciudad), por motivos de facilidad de adquisición y procesamiento de los datos obtenidos. Habitualmente, los estudios llevados a cabo por investigadores y profesionales de la termografía, con un carácter eminentemente manual y pragmático, se focalizan sobre elementos concretos de interés (ej. instalaciones, defecto en cubierta...), dejando a un lado los análisis globales a escala de edificio, por tratarse de una tarea que acostumbra a consumir demasiado tiempo y recursos (Shao 2011). En el otro extremo, se sitúa un considerable número de trabajos a nivel de ciudad, promovidos principalmente por climatólogos urbanos, que se sirven de mediciones aéreas para obtener, de manera ágil, gran cantidad de información que es procesada mediante algoritmos automáticos (Weng 2009a).

El presente análisis de bibliografía revela que existen pocos estudios urbanos basados en termografía centrados de manera específica en los fenómenos térmicos a nivel de calle, a pesar de que éste constituye la primera escala urbana con posibilidad real de intervención. El desarrollo de estudios termográficos a esta escala intermedia puede ayudar a la comprensión del microclima radiante urbano (Tamura et al. 2001), con una influencia sobre el confort del peatón, e indirecta sobre las condiciones de los interiores de los edificios (Halawa et al. 2014). Como posibles causas de la escasez de este tipo de trabajos, destacaremos: las dificultades operativas de las mediciones en ambiente urbano (ej. tráfico rodado, personas en movimiento...), el acceso limitado de los investigadores a medios técnicos adaptados al entorno de medición (ej. elevado coste de los escáneres IR móviles) y la complejidad del procesamiento de datos derivada de una falta de herramientas específicas.

2.4.2 Temporalización de las medidas

La termografía es una técnica que permite obtener imágenes casi instantáneas de la temperatura actual que presenta una superficie, pero dicha información es resultado de una historia térmica. Por ello, la variable “tiempo” deberá ser tenida en cuenta para interpretar los resultados. Dentro de los estudios termográficos, se identifican **tres enfoques en relación a la temporalización de la medición: toma de datos puntual, múltiple o secuencial.**

En la práctica habitual, los profesionales de la termografía tienden a capturar una serie de imágenes térmicas durante una visita a un edificio, pero sin realizar un estudio continuado (Shao 2011). La toma de datos puntual es el enfoque profesional predominante dada su agilidad y es útil para realizar valoraciones de la termografía de tipo cualitativo, sobre todo en relación al estado de las

instalaciones o a la detección de defectos (Lagüela et al. 2012). Sin embargo, este enfoque puede inducir a errores de interpretación asociados a efectos transitorios (Fox, Coley, Goodhew & Wilde 2015). En este sentido, los estudios compuestos por múltiples tomas de imágenes pueden aportar una información adicional para decidir si la “anomalía térmica” detectada en la termografía se debe a la existencia de un defecto constructivo o simplemente a un efecto ambiental, explicable dentro de un comportamiento físicamente normal del elemento constructivo⁵. Como ejemplo de estudios basados en tomas múltiples de termografías, destacaremos los trabajos basados en la comparación de datos térmicos aéreos obtenidos de sucesivos vuelos (Lagouarde et al. 2010).

Si la toma de datos se repite a intervalos de tiempo regulares, siguiendo un patrón temporal específico, hablaremos de *secuencia termográfica*. A partir de este tipo de mediciones es posible obtener, *a posteriori*, comportamientos térmicos promedio sobre periodos representativos (Figura 2.8). En este caso, será crucial la definición de una resolución temporal adaptada a la finalidad del trabajo, pudiendo ir de los pocos segundos [ej. 22s para la detección de defectos estructurales, en (Hamzah 1996)], a tiempos de una hora o más [ej. 60 min para el estudio de las temperaturas del edificio según las condiciones ambientales, en (Lehmann et al. 2013a)]. Este tipo de medición busca una mejor comprensión del flujo de calor transitorio dentro de los elementos constructivos (Fox, Coley, Goodhew & De Wilde 2015). Además, permite encuadrar el comportamiento de los materiales dentro de los ciclos ambientales de su entorno. Dado que este tipo de medición plantea una mayor complejidad operativa y consumo de tiempo, su empleo se circunscribe habitualmente al ámbito de la investigación y no al mundo del termógrafo profesional.

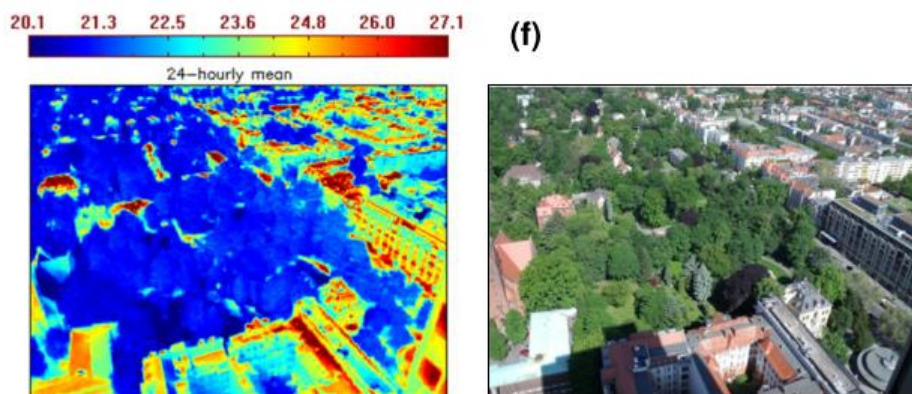


Figura 2. 9 Promedio de temperaturas en 24h obtenido a partir de termografías cada minuto y fotografía del área de estudio de Berlín en el trabajo de (Meier et al. 2011)

⁵ Un posible ejemplo de esta casuística es la identificación errónea como puente térmico de la zona bajo el voladizo de un balcón, más caliente en una termografía puntual invernal. Una repetición de la termografía en ausencia de calefacción mostraría la misma anomalía térmica, asociándola al elevado factor de vista entre superficies.

2.4.3 Técnica de medición

Las distintas técnicas de medición mediante termografía IR pueden agruparse en dos familias principales: la termografía pasiva y la activa (Kylili et al. 2014). En las técnicas pasivas, las muestras o elementos constructivos analizados están a su temperatura natural, diferente a la del ambiente (más alta en las mediciones de invierno y más baja en las de verano). Este tipo de técnicas permite estudiar el comportamiento real de los elementos construidos frente a los estímulos ambientales habituales a los que están sometidos (Lehmann et al. 2013a), como la detección de defectos [si el gradiente entre el exterior e interior es mayor de 15K, según (Vollmer & Möllmann 2010)].

Por el contrario, en las técnicas activas, se aplica un estímulo externo sobre las muestras para inducir o acentuar el contraste térmico. A su vez, según la naturaleza del estímulo, se pueden distinguir varias técnicas activas de termografía (Maldague 2002): termografía pulsada (PT), termografía *lock-in* (LT), termografía *step-heating* (SH), termografía de fase pulsada (PPT, combinación de PT+LT), vibrotermografía (VT), etc.

Del estudio de la literatura se desprende que el enfoque pasivo predomina tanto en el uso profesional de la termografía en ambientes construidos, como en el mundo académico, siendo compatible tanto con enfoques cualitativos como cuantitativos, para análisis que van desde la escala local (Doulos et al. 2004), a la de ciudad (Lagouarde et al. 2010), pasando por la del edificio (Shao 2011) y de calle (Boiné et al. 2018).

En cambio, por lo que respecta a las técnicas activas, debido a las propias dificultades técnicas para producir el estímulo externo, éstas suelen limitarse a estudios locales, tanto *in situ* como en laboratorio, enfocados a la determinación de las propiedades materiales o al comportamiento de ciertos elementos constructivos mediante la termografía pulsada y la *lock-in*, (De Freitas et al. 2014; Fox et al. 2012; Grinzato et al. 1998).

2.4.4 Procedimientos de adquisición de datos

El procedimiento de adquisición de datos es un aspecto que condiciona significativamente el coste de adquisición de la misma (en tiempo y recursos), el tipo de la información que se puede obtener y el post-procesamiento de la misma. En esta revisión, distinguimos entre procedimientos de medición **terrestres o aéreos** que, a su vez, pueden ser adquiridos de **forma manual** (un técnico maneja la cámara), **semi-automática** (se programa una cámara instalada en un vehículo manejado por un técnico) o **completamente automatizada** (dispositivo de medición instalado sobre un vehículo, con una pre-programación de la toma de datos).

Las mediciones terrestres manuales se emplean para estudios a pequeña escala (locales, edificio). Presentan las ventajas de poder ser realizados con equipos de coste reducido, incluir el muestreo de los espacios interiores y analizar los elementos de pequeño tamaño con gran resolución, al tomarse imágenes desde distancias muy pequeñas (Shao 2011).

Conforme aumenta la escala de medición, sobre todo a escala de ciudad, los estudios muestran una tendencia a la adquisición de datos aéreos y un mayor nivel de automatización (Weng 2009a; Lagouarde et al. 2010; Artis & Carnahan 1982). Tradicionalmente, las termografías aéreas se han realizado de forma automática desde satélites [LANDSAT, MODIS, ASTER, como repasa (Weng 2009b)] o semiautomática desde vehículos aéreos de tamaño medio [helicóptero o avioneta, como en J. P. Lagouarde et al. 2010]]. Este tipo de estudios aéreos centra el foco de atención en las cubiertas y otras superficies casi-horizontales, como el pavimento, quedando las fachadas infra-muestreadas y/o afectadas por ángulos muy oblicuos de visión, que requieren de diversas correcciones atmosféricas en función de la distancia.

En las escalas intermedias, sobre todo a nivel de calle, es donde se plantean los mayores retos para seleccionar el procedimiento de medición. Por un lado, la termografía terrestre manual plantea limitaciones para adquirir y procesar datos a esta escala, al menos, siguiendo el enfoque tradicional que recomienda analizar frontalmente los elementos de estudio y a corta distancia (Minkina & Dudzik 2009; Usamentiaga et al. 2014; Vollmer & Möllmann 2010). Por otro lado, las tecnologías automáticas de medición terrestre aún están en desarrollo (Phan 2012, desarrolla una metodología para crear un *Thermal-Google-Street-View*) y son poco accesibles (ej. el precio de un equipo que permite obtener una nube de puntos colorizada visual y térmicamente de manera automática caminando a pie de calle, tipo cámara TAU 2 de FLIR sobre Backpack Pegasus de Leica, es muy elevado).

Recientemente, la difusión de vehículos aéreos no tripulados (drones), más pequeños y flexibles, y con un coste relativamente bajo, abre nuevas posibilidades para los estudios térmicos, por ejemplo, para la realización de estudios termográficos secuenciales a nivel de cubierta que puedan ser fusionados con información terrestre para generar estudios a nivel de envolvente térmica completa [en la línea de (Voogt & Oke 1997), pero con una mayor espacialización de los resultados].

2.4.5 Enfoque de análisis

La termografía permite realizar análisis tanto **cualitativos como cuantitativos**, que pueden ser empleados de forma individual o **mixta** (Hart 1991).

Los **análisis cualitativos** se basan en la evaluación visual de los patrones de color de las termografías, traducción gráfica de las diferencias de radiación recibida por la cámara en las distintas direcciones espaciales. La evaluación de los resultados puede derivarse de la detección de anomalías en los patrones en base a la experiencia o bien de la comparación de patrones que teóricamente deben comportarse de forma similar.

Los **análisis cuantitativos** consisten en la evaluación de la temperatura en un determinado punto o región de interés, bien a través de valores puntuales, promedio, o estableciendo rangos o gradientes. Dado que los análisis cuantitativos pueden requerir diferencias de temperatura entre imágenes más precisas/más bajas en comparación con el análisis cualitativo, éstos pueden necesitar resoluciones temporales más cortas (Fox, Coley, Goodhew & De Wilde 2015).

Como se ha comentado en el *epígrafe* 2.3, la emisividad es un parámetro con gran influencia sobre los valores de temperaturas obtenidos por medio de termografías. Sin embargo, como señalan Barreira & de Freitas (2007), si el estudio tiene como objetivo un análisis cualitativo de los resultados donde prime el enfoque comparativo, el valor de emisividad seleccionado no es muy importante. Por el contrario, en aquellos estudios cuantitativos enfocados a conocer la temperatura “real” de los objetos, la precisión en determinar la emisividad y el resto de parámetros ambientales necesarios para la calibración de las imágenes será crucial (Minkina & Dudzik 2009).

En este sentido, existen estudios termográficos que optan por emplear la termografía para analizar las *temperaturas aparentes* de la escena, asumiendo que todos los cuerpos de la escena se comportan como cuerpos negros (Clausing 2007; Holst 2000). Este enfoque es habitualmente empleado en trabajos donde se analizan escenas en las que conviven distintos materiales o éstos se observan bajo diferentes ángulos (ϵ variable), como ocurre a escala de calle o ciudad (Lagouarde et al. 2010; Voogt & Oke 1997). Este tipo de enfoques permite realizar análisis cuantitativos-cualitativos, tomando con “reservas” los valores absolutos de temperatura obtenidos.

Tras el análisis de publicaciones llevado a cabo, se observa que, en el ámbito académico, los enfoques cuantitativo o mixto predominan sobre los análisis exclusivamente cualitativos. Esta situación contrasta con la práctica profesional diaria del termógrafo, donde impera la interpretación cualitativa, casi exclusivamente.

2.4.6 Finalidad del estudio

Aunque la técnica de la termografía tiene múltiples aplicaciones particulares dentro de los ambientes construidos, de la revisión bibliográfica se desprenden cuatro finalidades generales, dentro de las cuales pueden englobarse las aplicaciones de las diferentes referencias estudiadas.

La primera de ellas es **la detección de irregularidades en la construcción**, orientada principalmente al diagnóstico no destructivo de defectos (*non-destructive testing* o *NDT*) en edificios existentes o al control de calidad en edificación nueva o rehabilitada, empleando tanto técnicas activas como pasivas (Kylili et al. 2014). Entre los defectos constructivos que pueden ser detectados mediante termografía IR, destacan los relacionados con la estanqueidad al aire o al agua (infiltraciones), las pérdidas por conducción (defectos en el aislamiento o puentes térmicos), las instalaciones defectuosas, la presencia de humedades de condensación y los problemas estructurales (Balaras & Argiriou 2002; Fox et al. 2014). En ocasiones, las irregularidades térmicas no constituyen un defecto, sino el simple reflejo de una particularidad constructiva del edificio, no perceptible a simple vista. Este sería el caso del estudio termográfico que ayudó al descubrimiento, en 2017, de una nueva cámara en la Pirámide de Keops.

Las segunda finalidad general de la termografía sería la **caracterización de propiedades o comportamientos de materiales**. Un ámbito de investigación muy prolijo dentro de este grupo ha sido la aplicación de la termografía para la **cuantificación de propiedades energéticas** de los materiales. Destacaremos a este respecto los estudios enfocados a determinar la transmitancia

térmica (U) o la resistencia térmica (R) de materiales llevados a cabo por (Madding 2008; Nardi et al. 2014; Fokaides & Kalogirou 2011), en los que se utiliza la termografía pasiva, bajo condiciones ambientales pseudo-estacionarias. Estos métodos se presentan como alternativa experimental a las estimaciones propuestas por normativa estandar, donde sistemáticamente se ignoran los aspectos radiativos, y con los que reflejan variaciones de entre 10-20% (Fokaides & Kalogirou 2011). Dentro de la caracterización del comportamiento de los materiales, la termografía también se ha empleado para evaluar la degradación de los mismos como fruto de procesos del envejecimiento y el ataque de agentes biológicos (Mastrapostoli et al. 2016; Barreira & de Freitas 2007).

El tercer gran campo de aplicación de la termografía en ambientes constructivos es la determinación de la **temperatura radiante como parámetro ambiental** para la realización de estudios climáticos. La termografía se emplea cada vez de forma más habitual para el análisis espacial de los intercambios de energía en ambientes construidos, tanto en lo referido a los flujos por convección (Carlomagno & Cardone 2010), conducción (Shao 2011), como radiación en ondas largas (Loveday et al. 2017). Las aplicaciones prácticas de los estudios ambientales basados en termografía son variadas, abarcando tanto aspectos relacionados con el consumo energético de lo edificio y sus emisiones de CO₂ asociadas (Fox 2016), como la evaluación de aspectos relacionados con el confort, producido por los materiales (Doulos et al. 2004) o las configuraciones urbanas (Lee et al. 2018; Boiné et al. 2018).

2.4.7 Estado térmico analizado

Las superficies de edificios están naturalmente sujetas a variaciones en las temperaturas exteriores e interiores, principalmente debido al ciclo solar. Esto significa que las superficies urbanas presentarán mayoritariamente un estado térmico no estacionario o transitorio. Esta realidad entra en clara contradicción con las recomendaciones habituales de los manuales de termografía, donde se aconseja realizar los estudios en estado estacionario o, en su defecto, lo menos transitorio posible, situación que en la edificación se asocia con los momentos antes del amanecer, en ausencia de radiación directa y vientos menores de 1 m/s (Vollmer & Möllmann 2010; Balaras & Argiriou 2002; Kylili et al. 2014; Fundación de la Energía de la Comunidad de Madrid 2011).

La realización de análisis termográficos en un estado estacionario “real” es posible únicamente en entornos controlados de laboratorio y, por tanto, sobre elementos a pequeña escala (Madding 2008; Carlomagno & Cardone 2010). En consecuencia, la mayoría de los estudios sobre termografía urbana revisados se realizaron en estado pseudo-estacionario y, sobre todo, en estado, transitorio.

La principal ventaja de la inspección en estado transitorio, si se compara con la estacionaria, es el ahorro de tiempo y energía. Por un lado, por no tener que forzar el equilibrio térmico, los estudios en régimen transitorio son más rápidos, y pueden llevarse a cabo en cualquier momento. Por otro lado, la inspección en estado transitorio se realiza normalmente solo en un lado, siendo necesario calentar una capa poco profunda, mientras que en los estacionarios requieren que el gradiente se aplique a toda la pared, necesitándose un mayor aporte energético (Grinzato et al. 1998).

Existen sin embargo pocos trabajos que permitan evaluar la influencia de la fluctuación de los flujos de energía sobre la termografía, como señala (Lehmann et al. 2013a). Dentro de los factores meteorológicos, este trabajo destacó la importancia tanto de la radiación solar como de la infrarroja sobre los resultados obtenidos.

En definitiva señalaremos que, a pesar de que el trabajo bajo condiciones estacionarias pueda facilitar la interpretación de resultados para varias aplicaciones, típicamente la caracterización de materiales (Madding 2008; Asdrubali et al. 2012), el trabajo en condiciones no estacionarias es predominante. Incluso, en las aplicaciones relacionadas con el confort, es condición de partida.

2.4.8 Dos reflexiones a partir de la revisión bibliográfica

[El enriquecimiento de los modelos 3D con información termográfica]

La primera reflexión que surge a partir de la bibliografía es que, en la línea de lo que muestra (González-Aguilera et al. 2012), **la evaluación térmica de los elementos construidos puede ser mejorada cuando los resultados térmicos están referidos a geometrías reales.**

Existen varios enfoques para relacionar datos radiométricos con la geometría 3D de la que provienen. Uno de ellos consiste en generar un modelo 3D que después es colorizado con información radiométrica mediante un procedimiento de alineado (en inglés: *registering*) de imágenes termográficas (ej. modelo de nube de puntos generada a partir de escáner láser terrestre, en González-Aguilera et al. 2012; Lagüela et al. 2011). Un ejemplo de las posibles aplicaciones prácticas de este tipo sería la detección de defectos constructivos en edificios patrimoniales (Costanzo et al. 2014), donde se superpuso información térmica sobre aquellas zonas del modelo donde se detectaron irregularidades geométricas (Figura 2. 10).

Otro enfoque posible para correlacionar datos geométricos y radiométricos es aplicar técnicas de reconstrucción fotogramétrica sobre imágenes visibles y térmicas (Lagüela et al. 2012) o sólo sobre imágenes térmicas (González-Aguilera et al. 2013)⁶ para crear directamente un modelo geométrico-térmico (González-Aguilera et al. 2013; Lagüela et al. 2012), con el consecuente ahorro de medios técnicos y de tiempo. En esta línea, este grupo de investigación del TIDOP (Universidad de Salamanca 2018) ha desarrollado la herramienta PW_Photogrammetry Workbench (TIDOP 2012), que está siendo explotada comercialmente por varias universidades y entidades.

⁶ La realización de nube de puntos con termografías presenta más problemas que con fotografías debido a las características técnicas de las cámaras termográficas, incluyendo píxeles de gran tamaño, el formato de imagen pequeño, la alta sensibilidad a las variaciones de temperatura de la superficie y la baja sensibilidad a las variaciones de reflectividad radiométrica de la superficie (González-Aguilera et al. 2012).

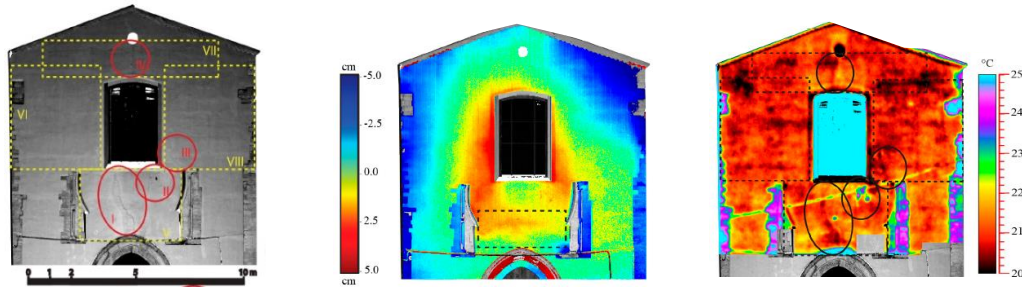


Figura 2. 10. Comparativa de la imagen de la nube de puntos colorizada según reflectancias obtenida de TSL, el mapa de desplazamientos relativo sobre el plano de referencia y la termografía de una iglesia (Costanzo et al. 2014).

Entre las posibilidades de la combinación de datos espaciales visuales y radiométricos, destacaremos las siguientes:

- Empleo del modelo para realizar correcciones atmosféricas según la distancia cámara-objeto (enfoque utilizado por Meier et al. 2011) o incluso, angulares (aspecto menos tratado).
- En el ámbito de la evaluación energética en edificación, la posibilidad de calcular la superficie real afectada por una determinada condición (por ejemplo, para cuantificar las pérdidas por conducción, como en González-Aguilera et al. 2012), información que no es posible obtener directamente de la termografía por las distorsiones inherentes a la propia imagen.
- Para la evaluación del confort, esta técnica mixta permite la obtención de imágenes térmicas 3D sobre las que evaluar aspectos relacionados con el confort, como sería el caso de la Temperatura Media Radiante, aspecto que fue trabajado empleando escáner IR por (Asano & Hoyano 1996; Tamura et al. 2001). Un ejemplo del tipo de resultados obtenido se muestra en la Figura 2. 11.

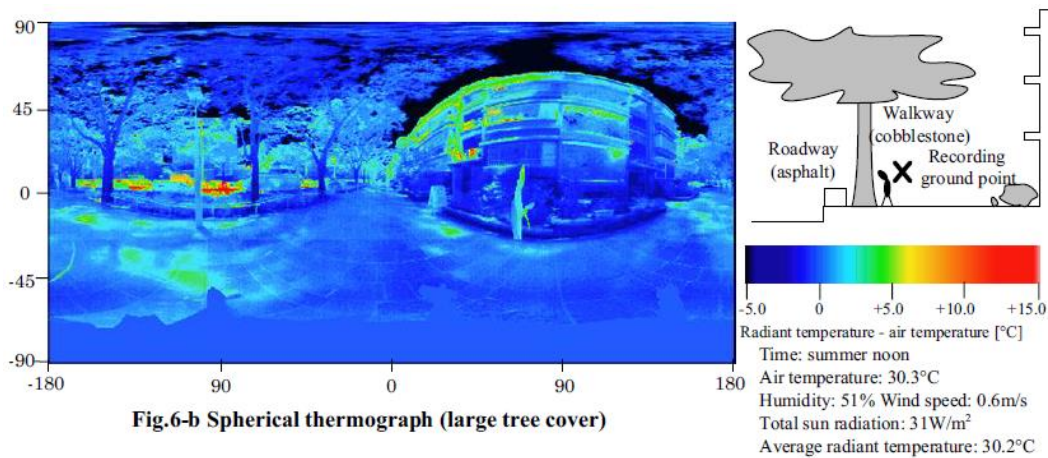


Figura 2. 11. Termografía esférica de un ambiente exterior arbolado (Tamura et al. 2001).

[Termografía real y simulada: potencial y retos]

El uso de datos de mediciones para la validación de modelos de simulación, y la calibración de los parámetros de las mismas, es una práctica habitual en la investigación científica. Por lo que respecta al ámbito de la termografía en la edificación, los estudios que combinan ambas metodologías suelen circunscribirse a escalas espaciales pequeñas. Así pues, la mayor parte de los estudios revisados en este estado del arte que emplean enfoque mixto simulación-medición, se centran sobre el comportamiento de un material o elemento constructivo que modelizan geoméricamente de manera muy simplificada.

Ciertos trabajos simulan la evolución de la temperatura sobre elementos partiendo de un enfoque unidimensional. Éste sería el caso, por ejemplo, del trabajo de (De Freitas et al. 2014), donde se comparan las termografías con simulaciones en WUFI para el estudio de los desprendimientos de los revestimientos de fachada.

En otros estudios, la cuestión se aborda como un fenómeno en dos dimensiones. Ejemplos de comparación entre termografías y simulaciones bidimensionales serían: (Barreira & de Freitas 2007), quienes estudian las condensaciones y temperaturas superficiales sobre los ETICS que favorecen el crecimiento de las algas en fachada; (Asdrubali et al. 2012), quienes simulan en FLUENT para estudiar cuantitativamente el efecto de los puentes térmicos sobre el coeficiente de transmisión térmica U (Figura 2.12). Estos estudios muestran que las aproximaciones 1D y 2D presentan buenos resultados para problemas locales y, especialmente, bajo estados térmicos estacionarios y con condiciones ambientales controladas en laboratorio. Sin embargo, conforme el alcance espacial del estudio aumenta, superando la escala de edificio, la consideración detallada de aspectos geométricos se vuelve crucial (Ghandehari et al. 2018; Lagourde et al. 2010) y la consecución de un estado estacionario prácticamente imposible (Lehmann et al. 2013b).

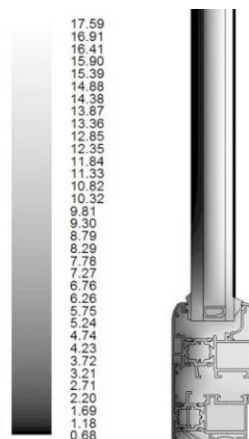


Figura 2. 12. Análisis 2D del campo de temperaturas en una carpintería en FLUENT (Asdrubali et al. 2012).

La principal limitación para comparar mediciones *in situ* y simulaciones radica en que, actualmente, la mayoría de los simuladores capaces de calcular el balance de energía sobre superficies urbanas se basan en métodos nodales, por definición incapaces de reflejar la heterogeneidad térmica de la ciudad real (Figura 2. 13). Para poder calcular los gradientes térmicos sobre las superficies, habría que emplear métodos de cálculo por elementos finitos, lo que exige mallar las superficies.

Para mejorar nuestra comprensión de la térmica urbana, sería útil disponer de mediciones térmicas y modelos a escala urbana, que permitan calibrar y optimizar los modelos de simulación, como vemos, aún en discusión a escala de ciudad. En este sentido, destacaremos el reciente trabajo realizado por el M.I.T, cuyos resultados se muestran en (Ghandehari et al. 2018).

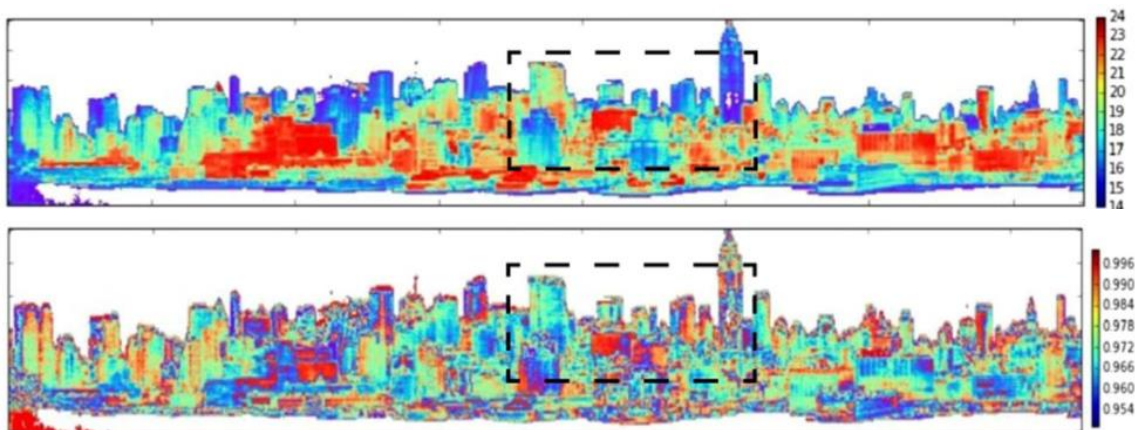


Figura 2. 13. Mapa de temperaturas y emisividad abajo de un área urbana de Nueva York en (Ghandehari et al. 2018).

[El interés de la termografía a nivel de calle en ambientes compactos]

Esta revisión bibliográfica ha mostrado que la termografía es una técnica con multitud de aplicaciones, para el estudio térmico de los ambientes construidos. Sin embargo, mientras que los análisis térmicos a escala de elemento constructivo y de ciudad son muy numerosos, el empleo de la termografía en escalas urbanas intermedias, a nivel de calle, es mucho más limitado. Esta realidad parece responder a la falta de procedimientos de medición adaptados específicamente a esta escala y la imposibilidad de extrapolar las técnicas de otras escalas.

Por lo que respecta a los ambientes urbanos compactos, *“a pesar de décadas de investigación buscando deducir el balance energético urbano, las dinámicas de los intercambios térmicos [...] aún se comprenden por completo”* (Ghandehari et al. 2018). En este sentido, el cañón urbano como unidad básica urbana, debería ser el punto inicial sobre el que fundamentar el resto de análisis, y la termografía podría ser una herramienta útil para “comprensión térmica” de este tipo de entornos.

Surgen varias preguntas al respecto: ¿cómo ha de termografiarse un cañón compacto a nivel de calle? La forma de medir ¿afectará a los resultados? ¿Podría esta desviación invalidar el análisis?. Estas preguntas serán abordadas en los epígrafes siguientes.

2.5 LA PERSPECTIVA EN TERMOGRAFÍA Y SUS IMPLICACIONES

La escena que aparece en una fotografía, ya sea en infrarrojo o en luz visible, es el resultado de la interacción entre las características del objeto (forma, tamaño, material, ubicación), las especificaciones de la cámara (campo de visión, resolución...) y la posición de la cámara con respecto al elemento fotografiado. Cada uno de estos aspectos impondrá una serie de limitaciones en relación a las imágenes que es posible realizar y condicionará su apariencia final. En la termografía, a diferencia de lo que ocurre en la fotografía ordinaria, la forma en la que se enfocan los objetos de la escena tendrá una repercusión no sólo a nivel compositivo, sino que afectará a la interpretación física de la información contenida en la imagen.

Los objetivos de este epígrafe son, en primer lugar, reflexionar sobre el interés de emplear la perspectiva en la termografía urbana en tramas compactas. En segundo lugar, exponer las consecuencias geométricas de un enfoque tangencial y sus implicaciones físicas en relación a la interpretación de las imágenes termográficas.

2.5.1 El interés de la perspectiva termográfica en ambientes urbanos compactos

En esta tesis, nos interesamos por las temperaturas de las superficies urbanas de tramas compactas, centrándonos especialmente en el caso de las fachadas. Este tipo de ambientes ocluidos, donde las fachadas presentan una escala considerable y se encuentran muy próximas entre sí, las posibilidades de enfoque a la hora de realizar termografías se ven limitadas por motivos geométricos.

Para ilustrar este aspecto, nos basaremos en el ejemplo de la *Rue des Tonneliers* en Bayona, entorno donde se desarrolló uno de los casos de estudio expuestos en el *Capítulo 4*.

Imaginemos que deseamos termografiar el cañón urbano de la Figura 2. 14, cuya altura y anchura promedio son, respectivamente de 6m y 14.3m, empleando una cámara con una resolución térmica de 150x200px y un IFOV de 19x25°. Si la cámara se coloca en la posición 1, enfocando en la dirección normal a una de las fachadas, se enmarca la superficie A1. Bajo estas condiciones, el área termografiada tendría una dimensión reducida (1.8x3m, aprox.), aunque la información radiométrica obtenida tendría una gran resolución espacial (cada pixel representaría en la realidad una superficie entre 6.5 y 13.6 mm).

En esta tesis, se pretende aportar una visión global del comportamiento de las superficies urbanas, más que una visión detallada de un componente constructivo en particular. Teniendo en cuenta esta premisa, sería interesante maximizar la fachada enfocada en la imagen, a costa de una disminución de la resolución, dentro de unos ciertos márgenes. Para ello, tendríamos **dos opciones para modificar la imagen tomada**.

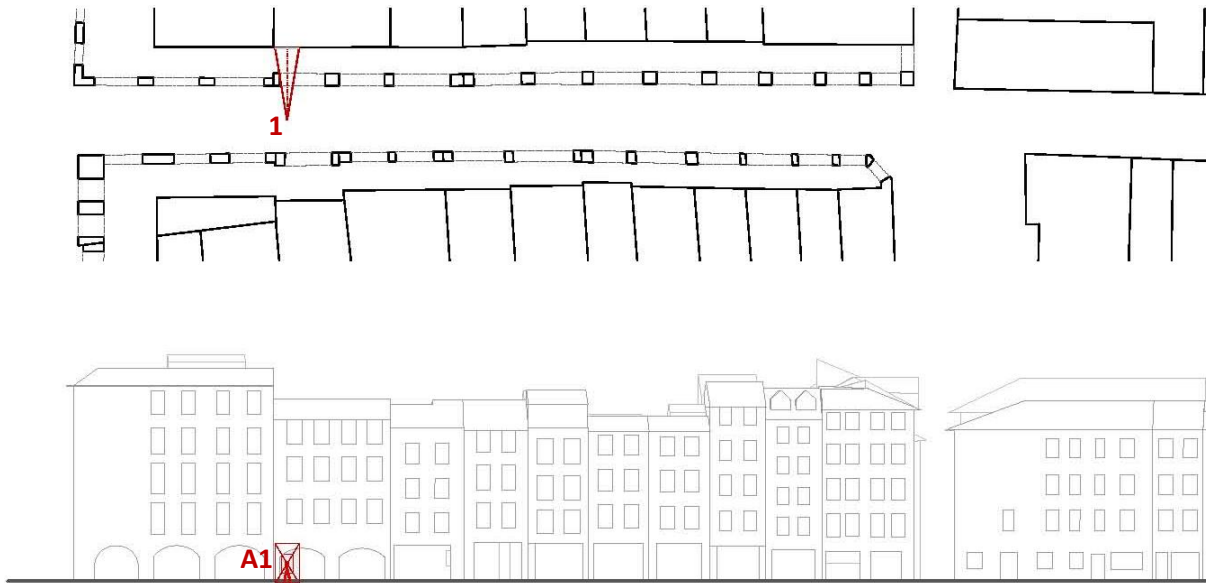


Figura 2. 14. Esquema en planta y alzado del área abarcada en una termografía en la dirección normal a la fachada realizada desde la posición 1 en la Rue des Tonneliers de Bayona

Una de las opciones sería **introducir cambios en los medios técnicos utilizados para tomar la imagen termográfica**. Por ejemplo, se podría cambiar el objetivo de la cámara por otro con una apertura angular mayor ($>IFOV$). En las cámaras comerciales más habituales, la apertura de los objetivos oscila entre los 19° y los 25° . Aunque en el mercado existen objetivos de gran angular (45° , 80° y 90°), su coste es elevado y no siempre están disponibles para todas las cámaras. Otra posibilidad consistiría en modificar el procedimiento de adquisición de las termografías. En este sentido, podría instalarse la cámara infrarroja sobre un elemento móvil (ej. *drone*, coche) que nos permitiese "barrer" una superficie más amplia de fachada. El potencial de estas técnicas es evidente: velocidad de adquisición, amplio alcance espacial, flexibilidad de enfoque... Sin embargo, también plantean algunas limitaciones: requieren unos medios técnicos de coste elevado; la toma de datos exige usuarios con una formación específica; a su vez, los datos obtenidos necesitan de un post-tratamiento considerable para el ensamblaje de las distintas imágenes; la complejidad técnica limita la toma repetida de datos...

La otra opción sería **modificar la posición de la cámara**, existiendo dos posibilidades de movimiento que pueden combinarse entre sí. La primera sería **alejarnos de la fachada a analizar**. En nuestro ejemplo, al mover la cámara hasta posición 2 (Figura 2. 15), se enfocaría un área de estudio A2 ($3 \times 4.85\text{m}$, aprox.), de tamaño algo mayor que el de A1 (por tanto, con una resolución algo menor, con un pixel de lado entre 12 y 19.2mm), pero que proporcionaría una visión aún muy parcial de la superficie. Observamos que para abarcar completamente la fachada tendríamos que alejarnos a una distancia mucho mayor, una opción que no siempre es posible dentro de un entorno urbano compacto como el que nos ocupa.

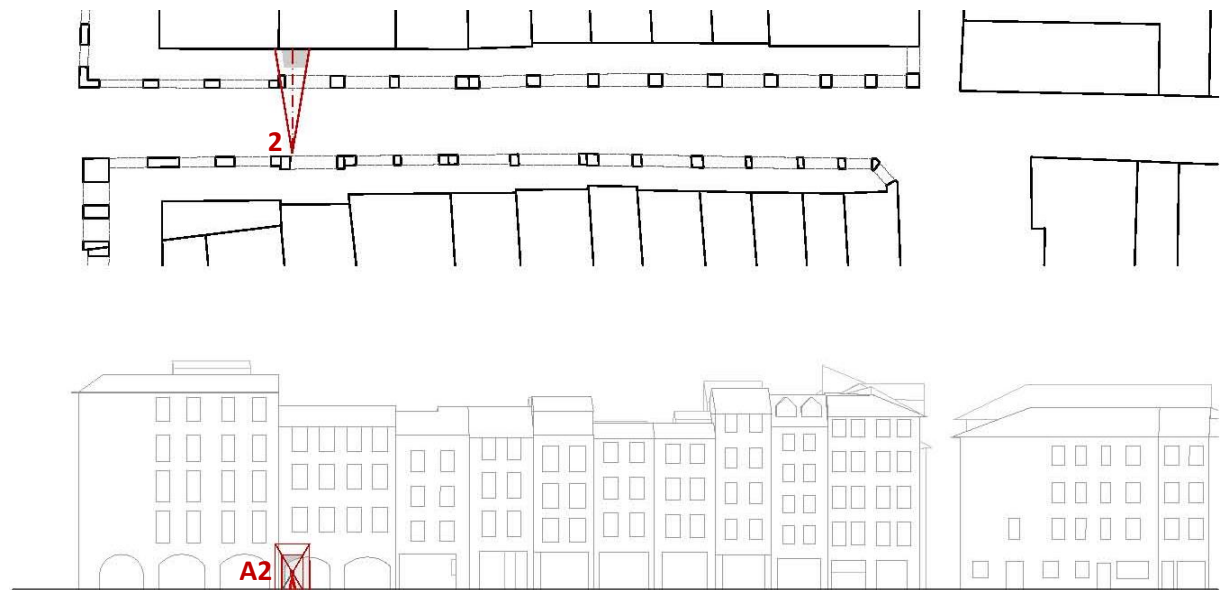


Figura 2. 15. Esquema en planta y alzado del área abarcada en una termografía en la dirección normal a la fachada realizada desde la posición 2 en la Rue des Tonneliers de Bayona

La segunda de las posibilidades de movimiento sería **girar la cámara, cambiando el ángulo con el que enfocamos la fachada**. En el ejemplo de la Figura 2. 16, la cámara se ha girado horizontalmente 75° hasta la posición 3. El hecho de observar los objetos desde una perspectiva más rasante (mayor ángulo de observación) permite aumentar el área de fachada termografiada considerablemente ($A3 \gg A2$). Esta acción tendrá, sin embargo, otras consecuencias geométricas. Por un lado, la distancia cámara-objeto se incrementa de forma notable. Por otro, la información de cada pixel hará referencia a una superficie de mayor tamaño, sobre todo en la dirección horizontal (pixeles más rectangulares).

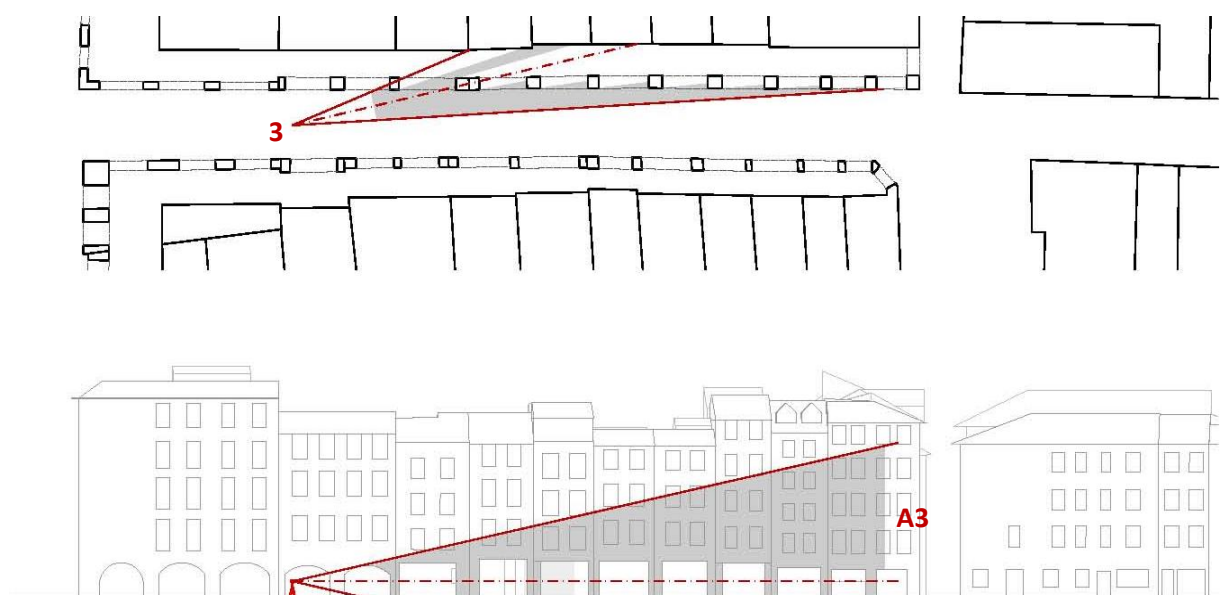


Figura 2. 16. Esquema en planta y alzado del área abarcada en una termografía en la dirección rasante a la fachada realizada desde la posición 3 en la Rue des Tonneliers de Bayona

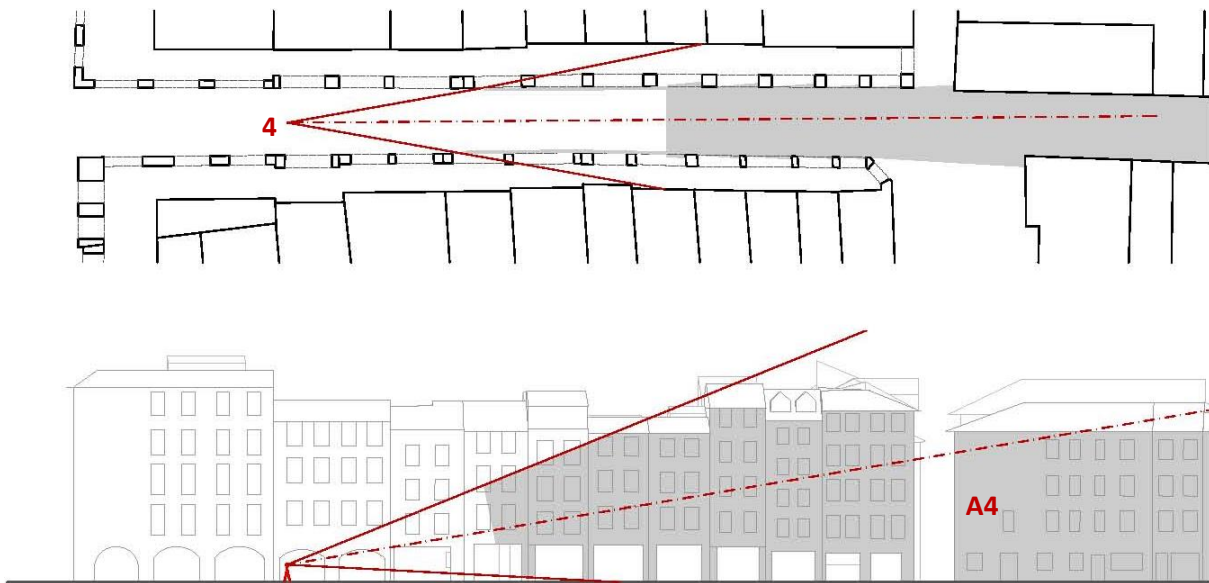


Figura 2. 17. Esquema en planta y alzado del área abarcada en una termografía en la dirección rasante a la fachada realizada desde la posición 4 en la Rue des Tonneliers de Bayona

En la Figura 2. 17, se muestra el caso en que este enfoque "rasante" se lleva al límite. Para ello, la cámara se ha alineado con el eje longitudinal de la calle (posición 4), inclinándola ligeramente hacia el cielo (10° con respecto a la horizontal). Como resultado, vemos que el área de fachada se maximiza (A4) y la visión del pavimento se reduce en favor de la cantidad de cielo visible. Esta última posición aporta una información adicional con respecto a las anteriores: la visión simultánea de dos fachadas.

En el caso de las tramas compactas, como muestran los gráficos anteriores, la búsqueda de una visión global del entorno construido lleva a mirar las superficies de forma rasante, un enfoque no muy habitual en los estudios termográficos. Para aplicaciones relacionadas con la construcción, las referencias bibliográficas aconsejan la realización de termografías bajo las condiciones más simples posibles: enfocar un solo elemento, visto perpendicularmente y desde una distancia corta, tomando las imágenes al amanecer en un día nublado (Vollmer & Möllmann 2010; Kylili et al. 2014). Estas recomendaciones han demostrado facilitar la interpretación de las imágenes termográficas, permitiendo a los usuarios sacar ciertas conclusiones sobre el comportamiento de un elemento individual o incluso a nivel de edificio (Grinzato et al. 1998; Fokaidis & Kalogirou 2011). Sin embargo, en los estudios termográficos a escala urbana, reunir todas estas condiciones no siempre es posible. Además, un enfoque orientado a la simplicidad puede entrar en contradicción con la heterogeneidad material y geométrica de los entornos urbanos reales y la variabilidad de sus condiciones límite.

En esta tesis, nos planteamos explorar el uso de la perspectiva en estudios termográficos a escala de la calle. Al cambiar la dirección de observación, se maximiza el área de superficies construidas visibles en la misma imagen, proporcionando información térmica de un cierto entorno construido desde un punto de vista más amplio. El empleo de una perspectiva tangencial permite la visión simultánea de fachadas enfrentada, lo que aporta una información adicional que puede ser útil para interpretar los

resultados obtenidos, al hacer más evidentes sus interacciones energéticas (ej. mejor comprensión de los patrones de sombra o de las reflexiones solares). Además, incluir en una sola imagen diversos elementos permite evaluar los procesos térmicos que tienen lugar en un entorno construido desde un punto de vista comparativo de una manera más inmediata (ej. diferencias entre las temperaturas de dos fachadas).

Éstas son algunas de las razones del atractivo de este enfoque que, al mismo tiempo, plantea importantes desafíos con respecto a la interpretación de los resultados. Algunas de las dificultades que surgen con el uso de la perspectiva están vinculadas a la complejidad inherente de los entornos urbanos, que ahora está presente en una sola escena: geometrías irregulares, heterogeneidad material, elementos en movimiento, condiciones de frontera desiguales... Otras, sin embargo, se deben simplemente a los cambios en la geometría relativa entre la cámara y el objetivo, como se explica en el siguiente epígrafe, continuando con el ejemplo de la *Rue des Tonneliers*.

2.5.2 Consecuencias del empleo de la termografía perspectiva

Girar la cámara en el interior de un cañón urbano, pasando de una vista frontal de la fachada a otra oblicua, introduce cambios **dos geométricos** que afectan a varios niveles en la interpretación de la información contenida en la termografía. Como se ilustra en el ejemplo de la Rue des Tonneliers (Figura 2. 18), estos cambios son: i) un aumento de la distancia entre el observador y el objeto; ii) un incremento del ángulo de observación.

Consecuencias a nivel visual: variación en la distribución de temperaturas

El uso de un enfoque tangencial afecta a cómo las temperaturas de los objetos son representadas visualmente dentro de la escena. El empleo de la perspectiva acentúa las deformaciones de los elementos presentes en la escena, apareciendo líneas de fuga reconocibles. Esto implica, por ejemplo, que puntos situados en la realidad en una misma vertical u horizontal se encuentren en la imagen a lo largo de líneas inclinadas y no en la misma fila/columna de píxeles. Asimismo, por la deformación de la perspectiva existirá también un cambio en la superficie aparente en función de la distancia, de tal forma que dos superficies con el mismo tamaño puedan corresponderse con un número diferente de píxeles en la imagen según su posición. Estos efectos deberán ser tenidos en cuenta al analizar las termografías.

Consecuencias a nivel físico: variación de la temperatura medida

Los cambios geométricos introducidos por la perspectiva también tendrán consecuencias a nivel físico sobre la interpretación de las termografías, resultando en una cierta desviación en la temperatura obtenida mediante un enfoque frontal y uno rasante. Estas implicaciones físicas de la termografía en perspectiva derivan de la forma en la que emiten radiación infrarroja los materiales, de cómo ésta se transmite a través de la atmósfera y de los principios de funcionamiento de la tecnología infrarroja de medición.

Por un lado, al enfocar los elementos de la escena de forma rasante, se produce un **aumento en la distancia entre la cámara y el objeto enfocado, que puede ser significativo**, pudiendo pasar de distancias de observación de unos pocos metros con un enfoque frontal a cientos de metros bajo un enfoque oblicuo (en nuestro ejemplo, de menos de 8m en la posición 1, a 150m en la posición 4). La consecuencia física de este aumento en la distancia es una **subestimación de las temperaturas** observadas en la termografía.

Este hecho se explica por dos razones (Faye et al. 2016; Minkina & Dudzik 2009). Primero, porque cuanto mayor es la distancia de observación, mayor es la absorción atmosférica de la radiación térmica emitida por los objetos de la escena en su camino hacia el sensor de la cámara. Segundo, porque, al aumentar la distancia de observación, disminuye la resolución térmica de la imagen. Así, un pixel representará objetos con una superficie cada vez mayor, y las temperaturas obtenidas serán un promedio. Según la literatura (Vollmer & Möllmann 2010; Faye et al. 2016), la relación entre la distancia de observación y la temperatura de la superficie no es lineal y depende en gran medida de las condiciones de contorno de las mediciones (humedad relativa, radiación solar incidente, temperatura del aire, etc.). Sería conveniente realizar más investigaciones sobre la interacción entre todos estos factores mediante mediciones *in situ* dentro del entorno construido.

Otro aspecto a tener en cuenta es que, cuando se acentúa la perspectiva, las distancias de observación presentes en una misma escena varían en gran medida. En el ejemplo de la *Rue des Tonneliers*, este hecho queda evidenciado por la presencia de un degradado de color entre el primer plano y el fondo de la imagen. Dado que los software comerciales de las cámaras térmicas permiten a los usuarios fijar una única distancia de observación para toda la imagen, este aspecto puede ser problemático para los análisis termográficos en perspectiva.

Por otro lado, al usar la perspectiva en la termografía se produce un **aumento del ángulo de observación**. En el caso de la *Rue des Tonneliers*, se puede ver que, para la dirección de observación normal (posición 1), las superficies enmarcadas en la escena se ven mayoritariamente bajo ángulos cercanos a 0° , mientras que las observadas tangencialmente constituyen una minoría. A medida que la cámara gira para agrandar la superficie encuadrada, el ángulo de observación aumenta, como también lo hace la variedad de ángulos presentes en la escena (ver el gradiente de color en la posición 4). En el caso extremo, cuando la cámara se alinea con el eje de la calle, una gran parte de las superficies de la escena se observan bajo ángulos rasantes ($>75^\circ$) y solo los elementos orientados al oeste, situados al fondo de la escena, se ven perpendicularmente.

Bajo ángulos de observación tangenciales, la precisión de las temperaturas superficiales medidas por técnicas IR puede ser cuestionada debido a la variación en comportamiento radiativo de los cuerpos según la dirección, que afecta a la emisividad. Dichas variaciones direccionales han demostrado influenciar de forma significativa los resultados de las mediciones termográficas aéreas en entornos urbanos, donde los techos y pavimentos son las superficies dominantes en la escena (Lagouarde et al. 2010). En la siguiente sección, se reflexionará sobre la importancia de este fenómeno en el caso de termografía en perspectiva a nivel de la calle, donde las fachadas constituyen el foco de interés.

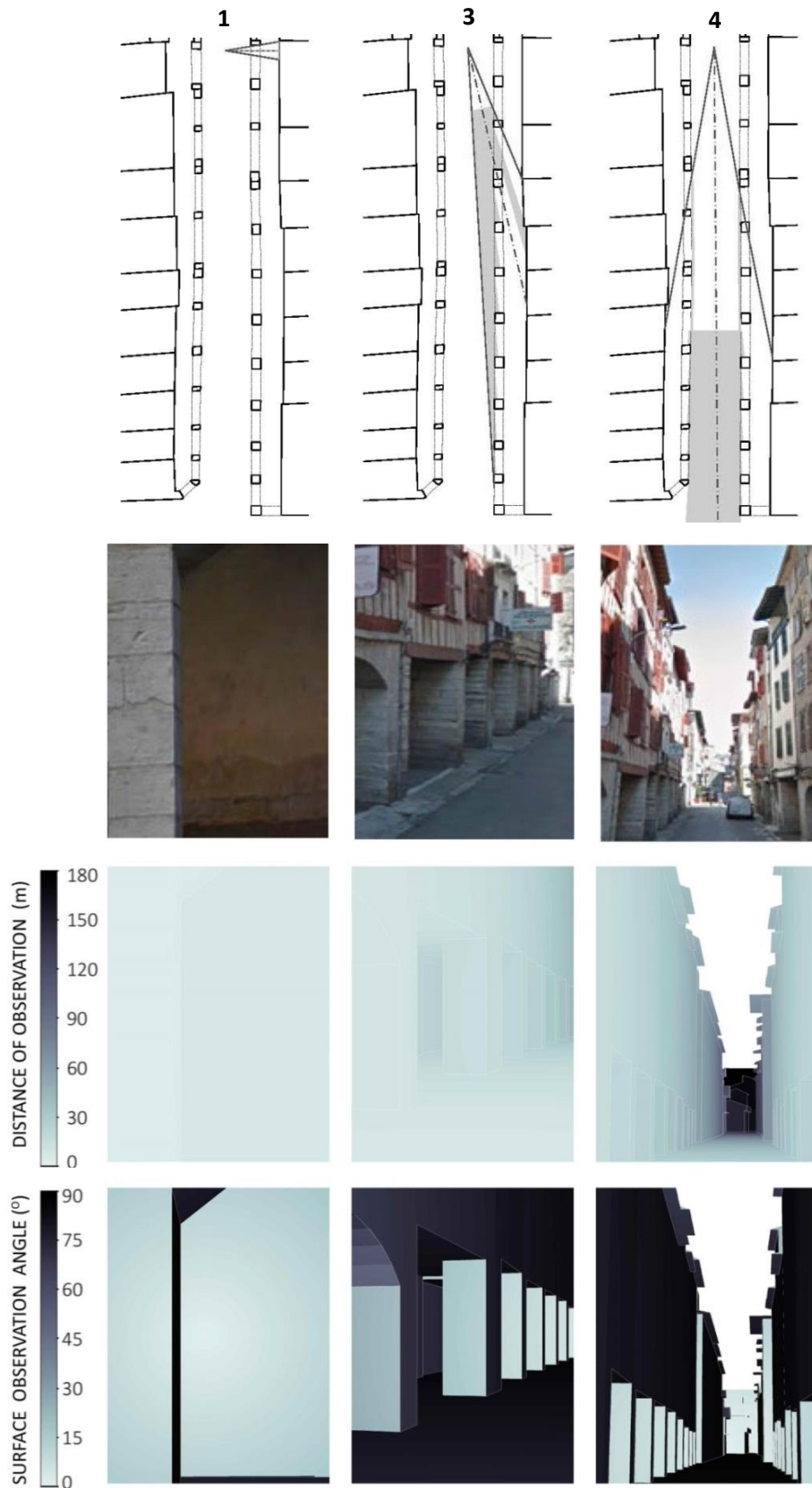


Figura 2. 18. Fotografías de la Rue des Tonneliers y gráficos sobre el ángulo y la distancia de observación entre la cámara IR y las superficies de modelo 3D de la calle desde un enfoque frontal, intermedio y rasante (posiciones 1, 3 y 4).

2.6 LA VARIABILIDAD ANGULAR DE LA EMISIVIDAD

Para explicar la influencia del ángulo de observación sobre las temperaturas observadas en las termografías, comenzaremos por explicar cómo se distribuye espacialmente la emisión de radiación infrarroja en los objetos, en función de su naturaleza.

2.6.1 Bases físicas del fenómeno

Cualquier cuerpo a una temperatura superior al cero absoluto emite una radiación térmica. Esta radiación describirá una curva continua a lo largo del espectro, con un máximo ubicado en la longitud de onda indicado por la *Ley de Wien* ($\lambda_{\max} = 0.002897 / T$). La cantidad total de radiación emitida para un cuerpo negro o gris, es decir, la integral bajo la curva en todas las longitudes de onda, vendrá expresada por la *Ley de Stefan Boltzmann*:

$$\Phi = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4 \quad [\text{W/m}^2] \quad (\text{Ec. 2.16})$$

Según esta expresión, vemos que distintos materiales (con ε distinta) a una misma temperatura emitirán diferentes cantidades de energía. El mismo material (misma ε) estando a dos temperaturas diferentes emitirá cantidades de energía dispares. En definitiva, la radiación emitida dependerá tanto de la temperatura del objeto como de su materialidad, que será caracterizada mediante un único parámetro: la emisividad.

La emisividad se define como el ratio entre la cantidad de radiación emitida realmente por el objeto y la que emitiría un *cuerpo negro* a la misma temperatura. Se trata, por tanto, de un parámetro adimensional cuyo valor, entre 0 y 1, se fija en relación a un modelo teórico, el del cuerpo negro, del que resaltaremos las siguientes características.

Un cuerpo negro es un cuerpo ideal capaz de absorber toda la energía radiante (fotones) que incide sobre él ($\alpha = 1$), sin importar su longitud de onda λ ni la dirección de la que provenga. Dado que para cuerpos en equilibrio la absorción y la emisividad son iguales (*Ley de Kirchhoff*), la emisividad de un cuerpo negro sería constante para todo el espectro y de valor 1 ($\alpha = \varepsilon = \text{cte} = 1$). Finalmente, el modelo de cuerpo negro establece que la radiancia L (W/sr m^2) será idéntica en todas las direcciones. Es decir, se considera que los cuerpos negros se comportan como emisores difusos perfectos (comportamiento isotrópico).

El comportamiento de los materiales reales difiere, desgraciadamente, del modelo del cuerpo negro en varios aspectos, lo que complica los análisis termográficos. En primer lugar, ningún cuerpo emite tanta radiación como un cuerpo negro a la misma temperatura, ya que no pueden absorber - ni por tanto reemitir - toda la radiación que sobre ellos incide. De ahí que la emisividad de los objetos reales sea siempre menor que uno ($\varepsilon < 1$).

En segundo lugar, las posibilidades de que un fotón sea absorbido, reflejado o transmitido al incidir sobre un cuerpo real son diferentes en función de su longitud de onda. Esto implica que la emisividad varía en función de la parte del espectro analizado ($\varepsilon \neq \text{cte}$).

En tercer lugar, los cuerpos reales no se comportan como emisores difusos isotrópicos, es decir, la radiancia que emiten cambia con la dirección. Por este motivo, la emisividad de los objetos reales, a diferencia de la emisividad del cuerpo negro, variará en función del ángulo de observación (δ). Como se observa en la Figura 2. 19, para la mayoría de materiales, la emisividad se mantiene prácticamente constante hasta un ángulo de observación de 45° con respecto a la normal. Sin embargo, para ángulos más rasantes, la emisividad varía de forma diferente según el tipo de material. En los de tipo metálico (conductores), la emisividad aumenta gradualmente a partir de los 45° , hasta alcanzar un máximo alrededor de los $70-80^\circ$. En cambio, los materiales no metálicos emiten la máxima cantidad de radiación entre la dirección normal y los 45° . Mientras que, para ángulos más rasantes, la emisividad disminuye de manera notable hasta la dirección tangente a la superficie. [El comportamiento de la reflectividad en ondas largas estará condicionado por el índice de refracción de los materiales y puede calcularse empleando las ecuaciones de *Fresnel* (Ditchburn 1961), aspecto que descrito más en detalle en el Anexo F].

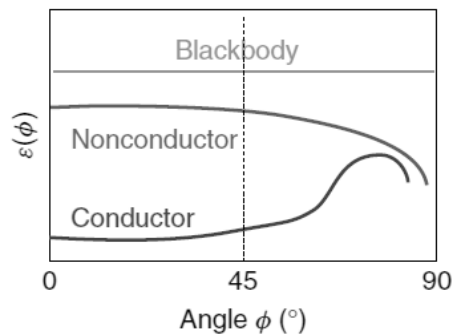


Figura 2. 19. Comportamiento genérico de la emisividad de los materiales según el ángulo de observación (Fuente: Vollmer 2010).

En ambiente construido, donde predominan los materiales no metálicos (dieléctricos o no conductores), el comportamiento de la mayoría de las superficies se asimilará al que se muestra en la parte derecha del esquema de la Figura 2. 20. Nótese que, al interpretar las termografías, se presupone que los materiales se comportan como se indica en la parte izquierda del diagrama, es decir, como cuerpos negros o grises.

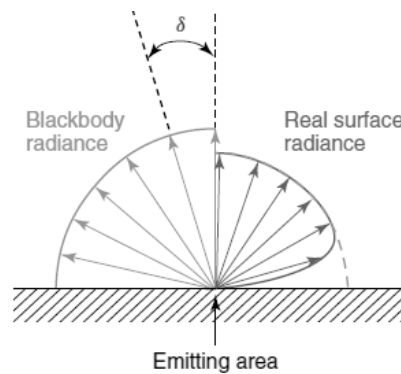


Figura 2. 20. Distribución angular de la radiancia L de una superficie emisora en función del ángulo de un cuerpo negro, un cuerpo gris y una superficie real de tipo no conductor (De: Vollmer 2010)

Los materiales habituales de construcción (ej, yeso, piedra, hormigón, etc.) presentan emisividades relativamente altas, generalmente superiores a 0,8 (Avdelidis & Moropoulou 2003). Este valor de emisividad se mantiene desde una dirección normal hasta los 45° (Vollmer & Möllmann 2010), cayendo de forma dramática a partir de un ángulo de observación crítico, situado en torno a los 70° (Howell et al. 2010). Un aspecto a tener en cuenta es que, recientemente, se está extendiendo el uso de materiales metálicos en fachada, cuya emisividad para ángulos rasantes se asimila a la de los materiales no conductores, disminuyendo el problema clásico de la termografía cuando aparecen este tipo de elementos en escena.

Por todo lo expuesto, sería posible reformular de forma más precisa la definición de **emisividad como el ratio entre la radiancia ($W/sr \cdot m^2$) emitida por un objeto hacia una cierta dirección (δ, ϵ) en una determinada longitud de onda λ y la emitida por un cuerpo negro que estuviese a la misma temperatura T y bajo las mismas circunstancias**. Vemos, por tanto, que la emisividad de un objeto no es un valor único, sino que debe fijarse en función de ciertas condiciones ($\delta, \epsilon, \lambda, T$).

A continuación, mostraremos las implicaciones que tendrá el cambio del ángulo de observación sobre la termografía, basándonos en cómo miden los dispositivos IR.

2.6.2 Consecuencias sobre la interpretación de las termografías

Las cámaras térmicas miden la radiación infrarroja dentro de un rango determinado y, de esta información, derivan las temperaturas de la superficie mediante un algoritmo basado en la *Ley de Stefan Boltzmann*. Para obtener resultados precisos de temperatura, el usuario debe especificar al menos cinco parámetros para calibrar la imagen térmica: humedad relativa, temperatura del aire, temperatura reflejada, distancia al objetivo y emisividad del objeto. Entre ellos, la emisividad es uno de los más influyen sobre a la precisión de los resultados de temperatura final y, lamentablemente, es el que presenta más dificultades para ser medido con exactitud, ya que su valor fluctúa dependiendo de varios factores: longitud de onda, temperatura del cuerpo, tiempo y también ángulo de visión (Minkina & Dudzik 2009). Por tanto, cualquier desviación entre la emisividad “real” del objeto y la emisividad “fijada” en el software se traducirá en una diferencia entre la temperatura “real” y la que se obtiene de la termografía.

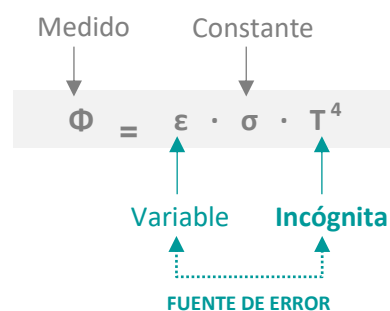


Figura 2. 21. Ley de Stefan Boltzmann y su aplicación simplificada a la termografía.

En la práctica habitual de la termografía, el valor de la emisividad se fija asumiendo que todos los objetos de la escena actúan como *cuerpos grises*. Es decir, se supone que se comportan como emisores difusos ideales tipo Lambert con una emisividad menor que 1. Los valores asignados a la emisividad provienen, bien de referencias tabuladas (Hart 1991; Vollmer & Möllmann 2010; Minkina & Dudzik 2009), o bien de mediciones *in situ*, según diversas técnicas (British Standards 2008; ASTM International 2006). En cualquier caso, dichos valores se corresponden con el concepto de emisividad total hemi-esférica o la emisividad normal, por lo que los efectos de la variación angular de la emisividad son habitualmente ignorados.

Para un gran número de aplicaciones de la termografía, la aproximación de los materiales como difusores ideales proporciona resultados de temperaturas con una precisión adecuada. Sin embargo, en estudios donde resulta que los objetos se termografían bajo ángulos de observación rasantes, la consideración de la emisividad como un parámetro isotrópico puede convertirse en una fuente de error (Minkina & Dudzik 2009). Pero, ¿qué consecuencias visuales puede generar la variación angular de la emisividad? ¿qué errores de interpretación pueden derivarse de ellas?

La primera consecuencia visual es que, objetos a la misma temperatura aparenten tener temperaturas diferentes. Dado que la radiancia de los objetos reales varía en función de la dirección de emisión, el sensor medirá distintas cantidades de radiación en función de cómo se mire el objeto. Como consecuencia, el algoritmo deducirá temperaturas diferentes que serán apreciables en la termografía a la escala adecuada. Dicho de otra forma, los cuerpos presentarán un “brillo infrarrojo” (\approx “luminancia térmica”) diferente, dependiendo del ángulo bajo el que se observen. Este comportamiento es diferente a lo que ocurre en las superficies difusoras a la luz visible, que serán igual de brillantes con independencia de la dirección en la que se miren (la luminancia visible de un difusor lambertiano es independiente del ángulo de observación).

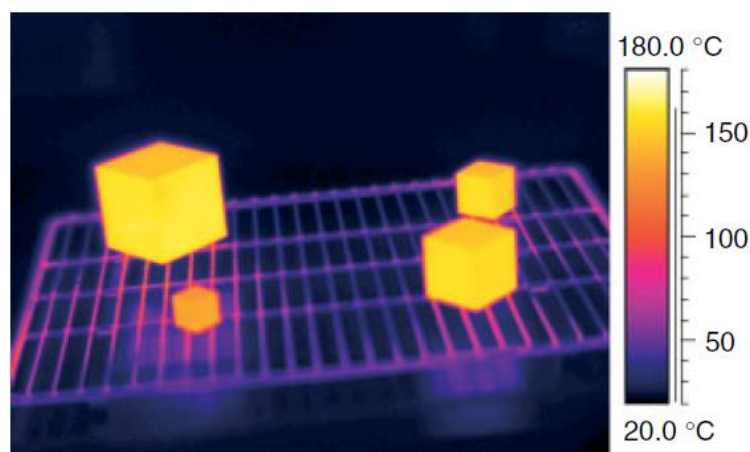


Figura 2. 22. Termografía de cubos de aluminio calentados a una temperatura uniforme (De: Vollmer 2010)

Este efecto se ilustra en el experimento mostrado en la imagen de la Figura 2. 22. En ella, vemos varios cubos, todos ellos fabricados en aluminio y con un acabado de pintura negra de alta emisividad. Aunque todas las caras se encuentran a la misma temperatura, la termografía muestra diferencias entre ellas. Esto se debe a que las caras laterales de los cubos se observan bajo un ángulo aproximado de 45° , mientras que su cara superior se observa bajo un ángulo mucho mayor. Como resultado, las caras superiores “parecen” estar a menor temperatura que el resto.

La **segunda consecuencia visual** se deriva directamente del principio de conservación de la energía. Los fotones que llegan a una superficie pueden ser reflejados (r), transmitidos (T) o absorbidos (α), cumpliéndose que $r + \alpha + T = 1$. Dado que emisividad (ϵ) equivale a la absorción (α), para un cuerpo opaco al infrarrojo ($T=0$), que serán la mayoría de los presentes en ambiente construido, **un descenso en la emisividad se asocia con un aumento de la reflectividad infrarroja**. Esto implica que, para ángulos de observación más rasantes, donde la emisividad es más baja, los efectos de la reflexión de radiación infrarroja serán más notables (Harman 2004).

La termografía de la Figura 2. 23 muestra la ciudad de Bayona vista desde el río Nive una noche despejada de primavera (23:00h). Lo más llamativo de la escena aparece sobre el río, donde se reconoce de forma clara el reflejo de las construcciones y la vegetación de ribera. Según las referencias, el agua presenta un comportamiento cercano al de un cuerpo negro ($\epsilon > 0.91$), y por tanto poco reflectante en las ondas largas. Sin embargo, bajo esta visión rasante, su emisividad baja, asimilándose a un “espejo infrarrojo”. Nótese que “el frío del cielo” se refleja peor que los edificios o la vegetación, ya que el agua genera una cierta emisión “de fondo”.

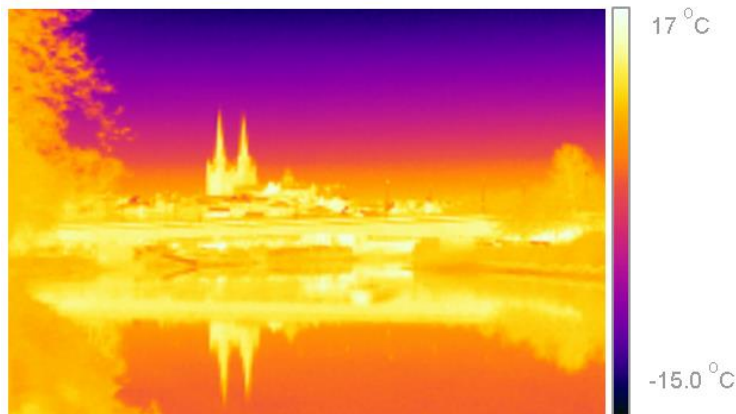


Figura 2. 23. Visión termográfica nocturna de la ciudad de Bayona reflejada sobre el río Nive

El **tercer efecto visual** reseñable sobre las termografías en perspectiva tiene que ver con el tipo de reflexión en ondas largas. Bajo ángulos rasantes, no sólo aumenta la cantidad de radiación infrarroja reflejada, sino que dicha reflexión tiene un carácter más especular. Este comportamiento se asocia al hecho de que, cuanto mayor es la longitud de onda con respecto al tamaño de las irregularidades del material, más probabilidades hay de que dichas ondas se reflejen especularmente. Esto lleva a que materiales difusores en el visible se comporten más especularmente en el infrarrojo bajo ciertas condiciones.

Este efecto es visible en las termografías de la Figura 2. 24. En ella vemos que, para longitudes de onda visibles, una hoja de papel se comporta como difusor, sea cual sea el ángulo de observación. Sin embargo, para longitudes de onda larga, este material refleja la radiación de forma especular bajo ángulos de observación muy rasantes, llegando incluso a reconocerse el reflejo de la cara sobre él.

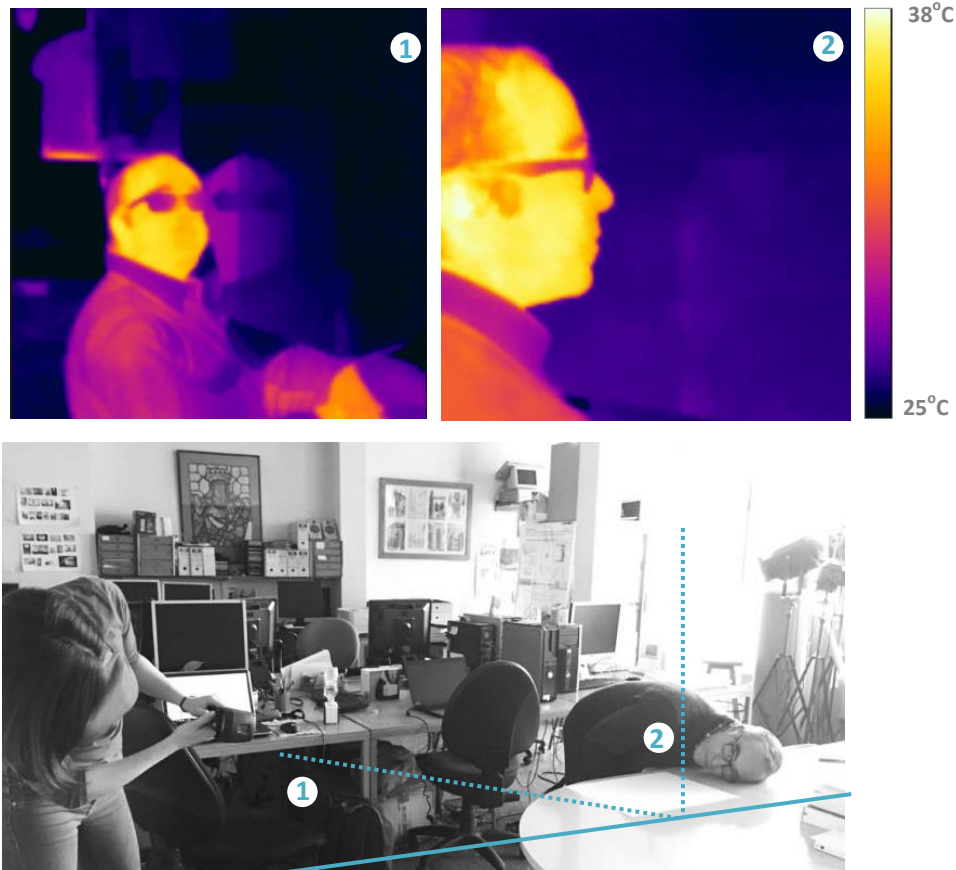


Figura 2. 24. Termografías en la dirección rasante (1) y normal (2) de una hoja de papel.

En este apartado, se han mostrado las consecuencias de la variación angular de la emisividad a nivel visual, sobre una serie de ejemplos ilustrativos. En el siguiente, se intentará cuantificar dichos efectos sobre los resultados mostrados por la termografía, en dos casos de estudios escogidos para analizar un aspecto específico:

- En el CASO 1, se analizará la direccionalidad de la emisividad en función de la rugosidad sobre unas muestras materiales en laboratorio.
- En el CASO 2, se evaluará la desviación en las temperaturas obtenidas enfocando frontal y tangencialmente dentro de un ambiente urbano real.

2.6.3 Cuantificación de los efectos de la variación angular de la emisividad

[CASO 1: Variación angular de la emisividad en función de la rugosidad de la muestra]

Caracterización de las muestras

Para estudiar la influencia de la rugosidad sobre la emisividad, se seleccionaron dos muestras de hormigón con distinta textura: una lisa y otra rugosa (Figura 2. 25). En la pieza de hormigón lisa, fabricada con áridos finos y con una superficie exterior pulida, las irregularidades tienen un tamaño inferior a 1mm. En cambio, los áridos de la pieza de hormigón rugosa, variados y de mayor tamaño, son visibles en la superficie, lo que hace que las irregularidades en vertical lleguen hasta los 5mm.

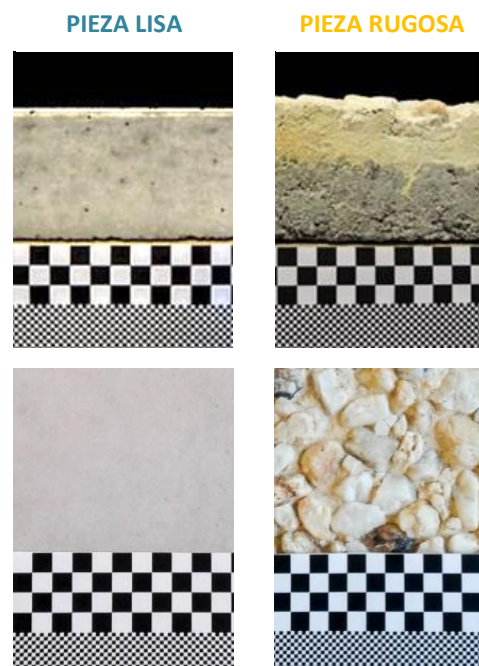


Figura 2. 25. Muestras de hormigón analizadas: pieza con textura lisa (izquierda) y rugosa (derecha).

Metodología

Para este estudio, se empleó la técnica de la termografía activa. Ambas muestras de hormigón se calentaron a 60°C dentro de una cámara climática, hasta que toda la pieza estuvo a régimen. Una vez fuera del dispositivo, las muestras se colocaron en una plataforma giratoria (Figura 2. 26 y Figura 2. 27), dentro de una habitación a temperatura ambiente, a una temperatura estable de 21°C. Comenzando desde una posición frontal (0°), se tomaron termografías de las muestras bajo ángulos de observación crecientes (10°, 20°...85°), girando la pieza primero en sentido horario (+) y, después, anti-horario (-). Además, durante la medición, se registraron las condiciones ambientales de la sala (termo-higrómetro) y la temperatura superficial en el centro de la muestra (como el promedio de dos termopares).

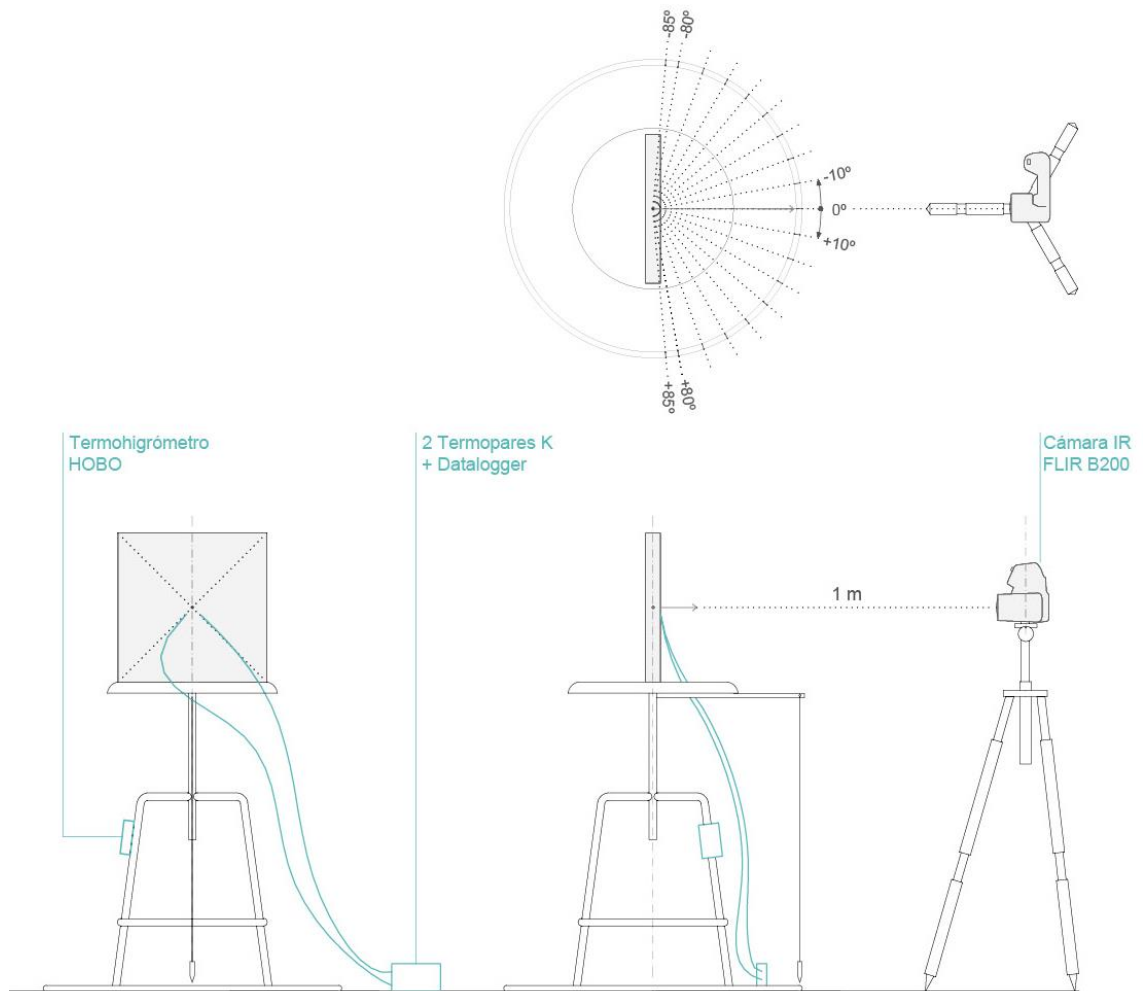


Figura 2. 26. Diseño de la instalación experimental de medición.

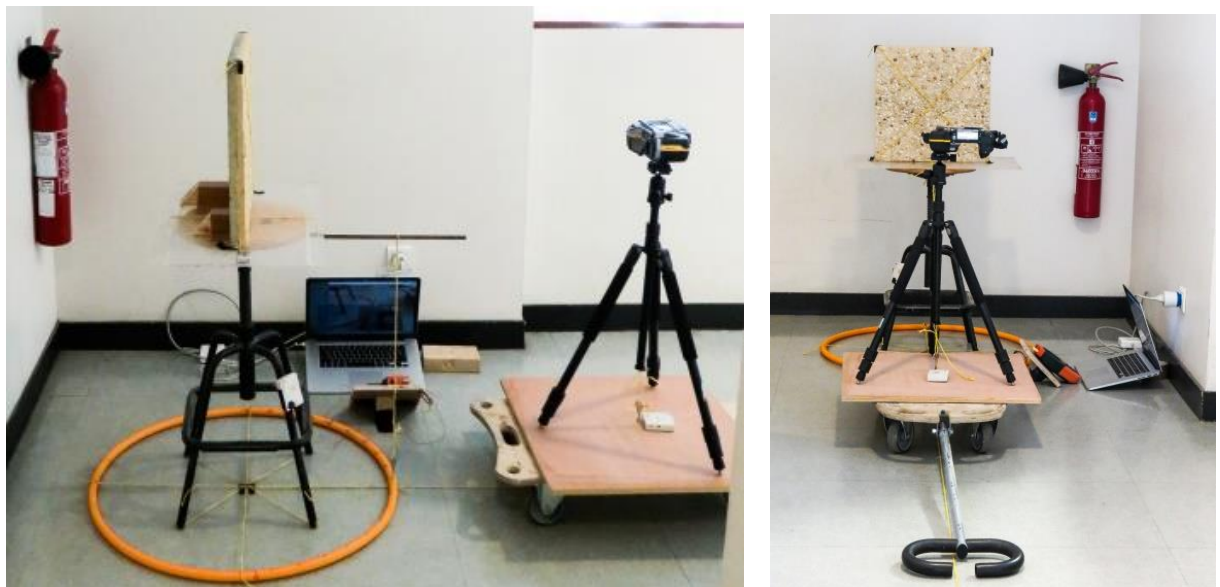


Figura 2. 27. Imágenes de la campaña de medición termográfica en laboratorio.

Resultados y discusión sobre la temperatura superficial en función del ángulo de observación

En la Figura 2.28 se presenta un extracto de las termografías de las piezas de hormigón lisa y rugosa, realizadas para tres ángulos de observación representativos (0°, 60° y 85°). Todas las imágenes fueron calibradas para un valor de la emisividad de 1 y unas condiciones ambientales del aire de 21°C y 44% humedad relativa.

En ambas piezas, se observa que, cuanto más tangencial es la vista, más fría parece estar la superficie de la pieza. Dado que las muestras pre-calentadas a 60°C permanecieron en un espacio a 21°C durante el test, y que la toma de imágenes comenzó desde la posición frontal, era esperable un enfriamiento de la misma entre la primera y la última imagen de la secuencia. Sin embargo, la magnitud de dicha disminución de temperatura varía según la técnica de medición, siendo mayor en las termografías que en las mediciones por contacto.

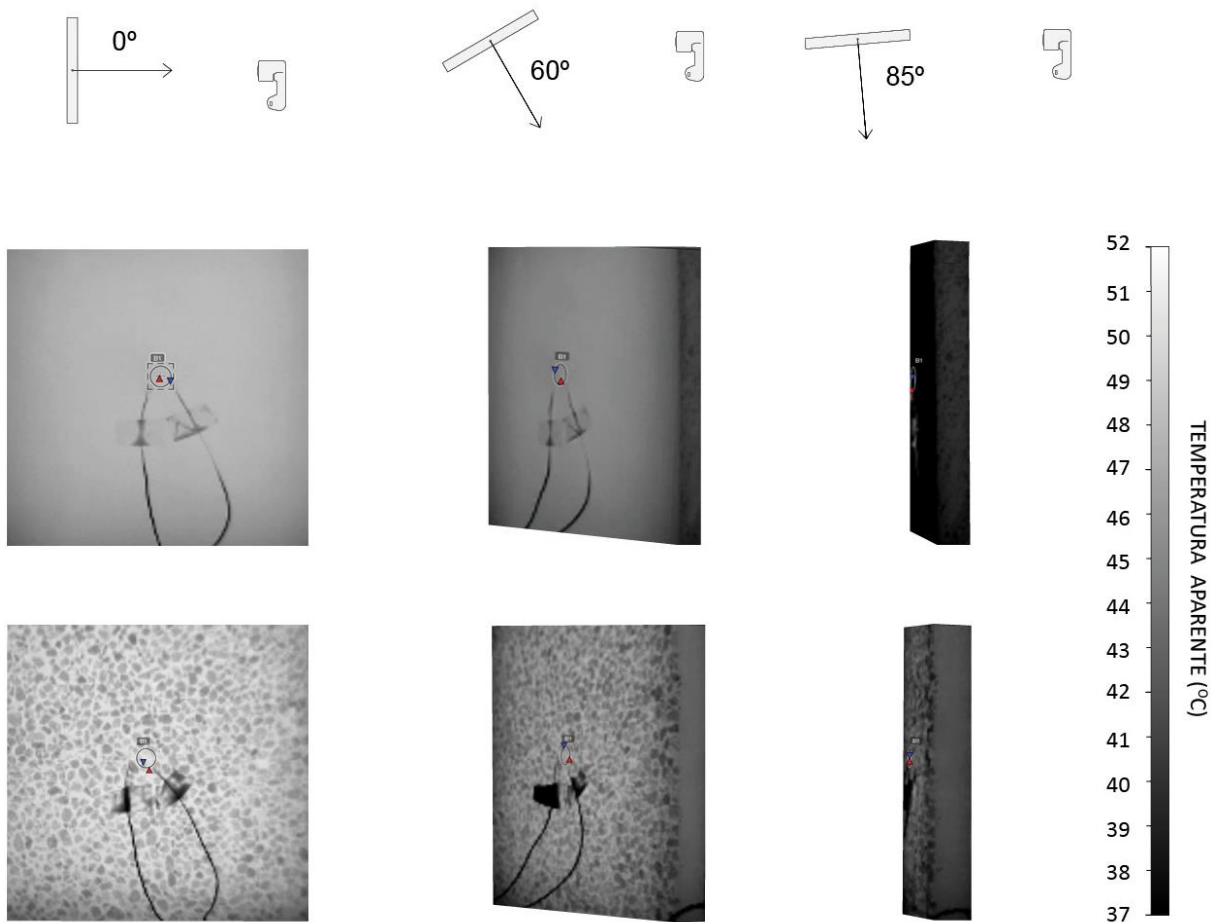


Figura 2. 28. Termografías de la muestra lisa (arriba) y rugosa (abajo) de hormigón analizadas vistas bajo un ángulo de observación de 0°, 60° and 85°.

Así, en el caso de la pieza lisa, el descenso de la temperatura entre la imagen frontal y la más tangencial fue de 3.1°C según los registros de los termopares (ΔT_K) y de 12.3°C de acuerdo con las termografías (ΔT_{IR}). Mientras que, en la pieza rugosa, dicha disminución de temperatura fue de 3.6°C y 8.1°C respectivamente (Tabla 2. 2).

Pieza LISA				Pieza RUGOSA			
α	+0°	+60°	+85°	α	+0°	+60°	+85°
TK	48.6	46.5	45.5	TK	50.4	47.8	46.8
TIR	47.8	44.9	35.3	TIR	49.5	46.1	41.4

Tabla 2. 2. Promedio de temperaturas superficial medidas por los termopares (TK) y por la cámara IR (TIR) para la muestra de hormigón rugosa y lisa.

Si la cámara muestra temperaturas más bajas, es porque ésta recibe una menor cantidad de radiación cuando la pieza está situada tangencialmente que en posición frontal, es decir, si su emisividad es menor en la dirección rasante que en la normal. Al descender la emisividad, la reflectividad aumenta y, con ella, la importancia de la temperatura del entorno. Si el entorno está más frío que el material, al observarlo de forma rasante, éste parecerá estar más frío de lo que en realidad está (como en nuestro caso). Sin embargo, si el entorno estuviera más caliente, al termografiar la pieza esta podría llegar a parecer más caliente.

Suponiendo que la temperatura “real” sea la registrada por los termopares, sería posible cuantificar este “falso enfriamiento adicional” añadido en las termografías a causa de la variación angular de la emisividad. Para valorar este efecto, se ha graficado la diferencia de temperatura entre el termopar (T_K) y la termografía (T_{IR}) en ambas muestras para las distintas direcciones analizadas en este estudio (Figura 2. 29).

Observamos que, la desviación entre ambas temperaturas es mayor cuanto mayor es el ángulo de observación (sobre todo a partir de los 60°) y cuanto menor es la rugosidad superficial de la misma (diferencias más notables en la pieza lisa que en la rugosa). La magnitud de esta desviación en la temperatura puede ser muy notable en la dirección más rasante, llegando a los 10.2°C en el caso de la pieza lisa y a los 5.5°C en la rugosa.

Finalmente, cabe resaltar que la desviación entre T_K y T_{IR} es mayor en las mediciones realizadas en sentido horario, cuando la pieza está más caliente, que en el sentido anti-horario, cuando la pieza se ha enfriado más. Esto significa que el error en la medición de temperaturas introducido mediante tecnología infrarroja por efecto del ángulo de observación tiende a disminuir cuando las temperaturas del objeto de medición y del entorno se aproximan.

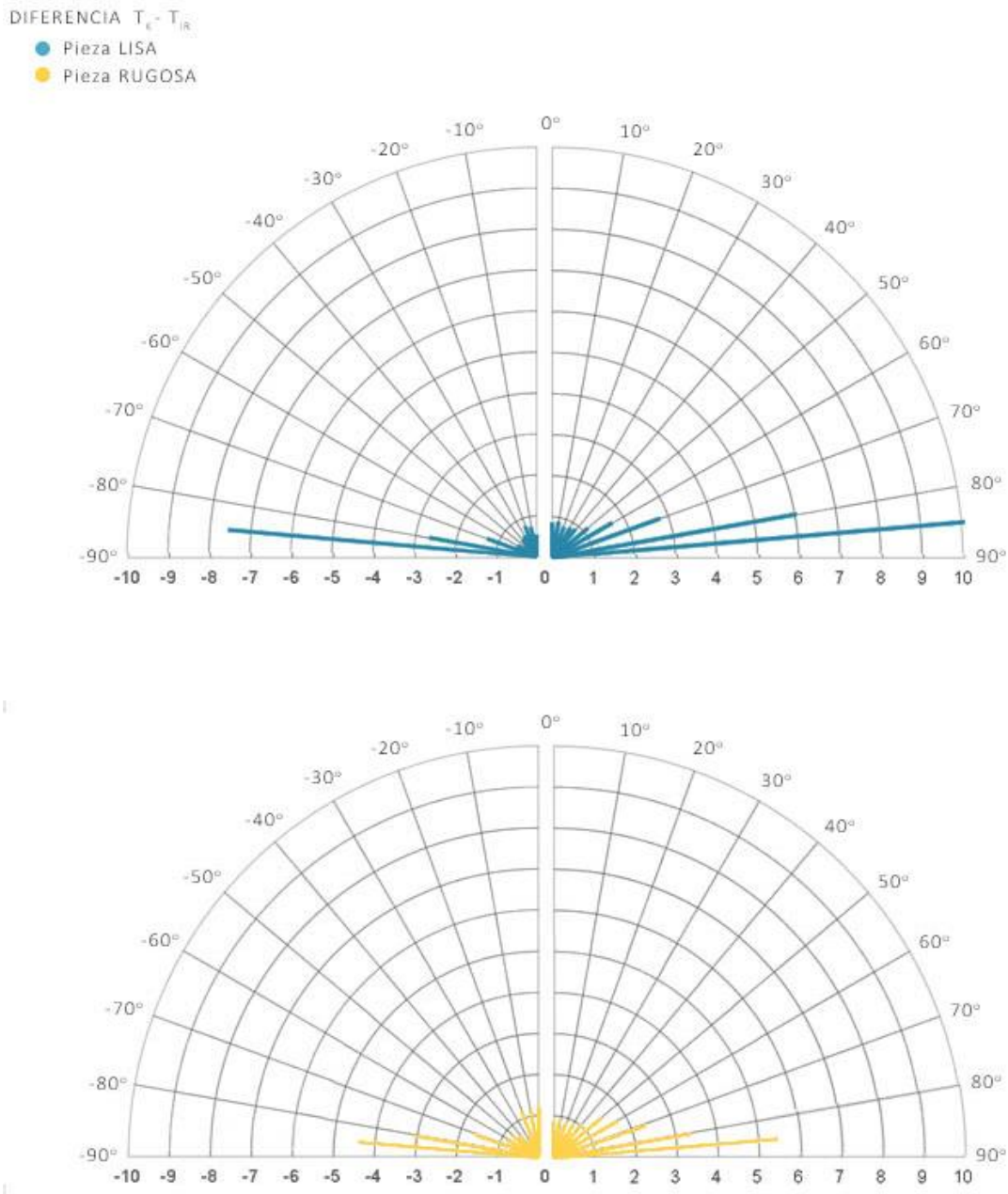


Figura 2. 29. Diferencial entre la temperatura medida por los termopares (T_K) y por la cámara IR (T_{IR}) en función del ángulo de observación para la muestra de hormigón rugosa y lisa.

Resultados y discusión sobre la variación angular de la emisividad

A partir de la diferencia de temperatura entre el termopar (T_K) y la cámara infrarroja (T_{IR}), se dedujo el valor de la emisividad para los diferentes ángulos estudiados. El procedimiento consistió en reducir gradualmente la emisividad, inicialmente fijada en 1, hasta que la T_{IR} mostrada en la termografía coincidiese con T_K sobre el software comercial de la cámara. Los valores de emisividad deducidos para ambas piezas para los ángulos estudiados se muestran en la Figura 2. 30.

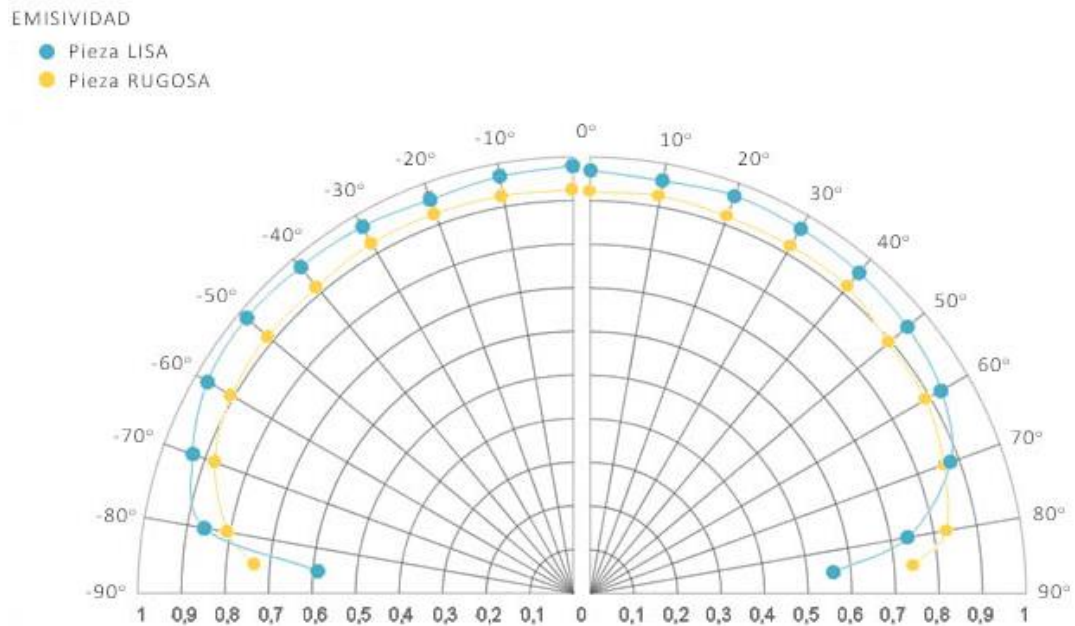


Figura 2. 30. Termografías en la dirección rasante (1) y normal (2) de una hoja de papel.

Según los resultados, la emisividad de ambos materiales es máxima en la dirección normal a la pieza y se va reduciendo conforme aumenta el ángulo de observación. Sin embargo, este descenso no es lineal. En ambas muestras, la emisividad se mantiene prácticamente constante entre la dirección normal y un ángulo de observación de 60° , mientras que, a partir de este ángulo, la emisividad desciende de manera drástica. Además, se observa que el cambio en la emisividad es más acusado en la pieza lisa que en la rugosa. Así, la emisividad pasa de 0.98 en la dirección frontal a 0.56 en la dirección más rasante en el caso de la pieza lisa y de 0.92 a 0.73 en la pieza rugosa. Esta variación explicaría la tendencia detectada en las temperaturas superficiales medidas por contacto y por infrarrojo ($T_K - T_{IR}$).

Según las referencias (Vollmer & Möllmann 2010; Minkina & Dudzik 2009), a mayor rugosidad superficial, mayor emisividad⁷. La explicación proporcionada a este comportamiento tiene una base puramente geométrica: las irregularidades constituyen formas convexas en las que se produce un atrapamiento radiativo que maximiza la absorción de radiación y, con ello de la emisividad.

Según nuestros resultados, contrariamente a lo esperado, la emisividad de la muestra lisa es mayor que la de la rugosa (excepto en los ángulos más rasantes). Este comportamiento podría deberse a las diferencias de composición de las muestras. A pesar de que ambas se engloben dentro de la categoría material del “hormigón”, los áridos que lo forman son diferentes, algo perceptible a simple vista. Sin embargo, el comportamiento de las piezas para los ángulos más rasantes concuerda con lo esperable a partir de las referencias bibliográficas, existiendo una menor disminución de la emisividad en la pieza rugosa.

⁷ Según Vollmer & Möllmann (2010, p.42): “[...] any rough surface has higher emissivity than polished flat surfaces”.

Observaciones finales del CASO 1

En este caso de estudio, se han estudiado las temperaturas superficiales de dos piezas de hormigón, una lisa y otra rugosa, mediante termografía activa y termopares adheridos a su superficie, bajo ángulos de observación crecientes entre 0° (posición normal) y 85° (posición rasante). A partir de ambas informaciones, se ha obtenido el valor de la emisividad de cada una de las muestras en las distintas direcciones.

Los resultados obtenidos muestran que los efectos angulares de la emisividad, sobre todo bajo ángulos de observación superiores a 60° , se traducen en cambios de temperatura que deben ser tenidos en cuenta al interpretar los resultados de la termografía (de hasta 10°C). Los cambios debidos a la variación angular de la emisividad serán más importantes cuanto más lisas sean las superficies y cuanto mayor diferencia exista entre el objeto de medición y su entorno.

Ambas piezas presentaron emisividades por encima de 0.9, valores dentro de los rangos expresados en la bibliografía para la familia de materiales de los hormigones (Avdelidis & Moropoulou 2003; Minkina & Dudzik 2009), aunque con ligeras diferencias entre ellas. Se ha visto que las diferencias debidas a la rugosidad pueden llegar a afectar al comportamiento angular de la emisividad tanto como las diferencias materiales.

[CASO 2_ Variación de la T_{SUP} aparente según el ángulo de observación en ambiente urbano]**Selección del emplazamiento**

La direccionalidad de la emisividad puede afectar a las temperaturas obtenidas a partir de termografías, sobre todo bajo ángulos de visión oblicuos. En los ambientes urbanos compactos, donde las dificultades de enfoque llevan al uso de la termografía perspectiva, este aspecto pone en cuestión la precisión de los resultados. Para evaluar la magnitud de la desviación entre una visión tangencial y una frontal en ambiente urbano, se desarrolló una campaña de termografía en el barrio de *Petit Bayonne*, el 8 de mayo de 2017. El lugar escogido fue la intersección entre la *Rue des Tonneliers* y la *Rue Pontrique*, lugar desde el que la misma fachada podía ser fotografiada tanto frontalmente como de manera rasante.

Metodología

Para la medición, se utilizaron dos cámaras infrarrojas del mismo modelo (FLIR B200), que fueron orientadas hacia un mismo edificio (Figura 2. 31). La cámara A, situada en el eje de la *Rue des Tonneliers*, enfocaba el edificio-objeto de forma tangencial (ángulo de observación promedio de 75°). La cámara B, situada en la *Rue Pontrique*, se orientó en una dirección frontal al edificio (ángulo de observación promedio de 4°).

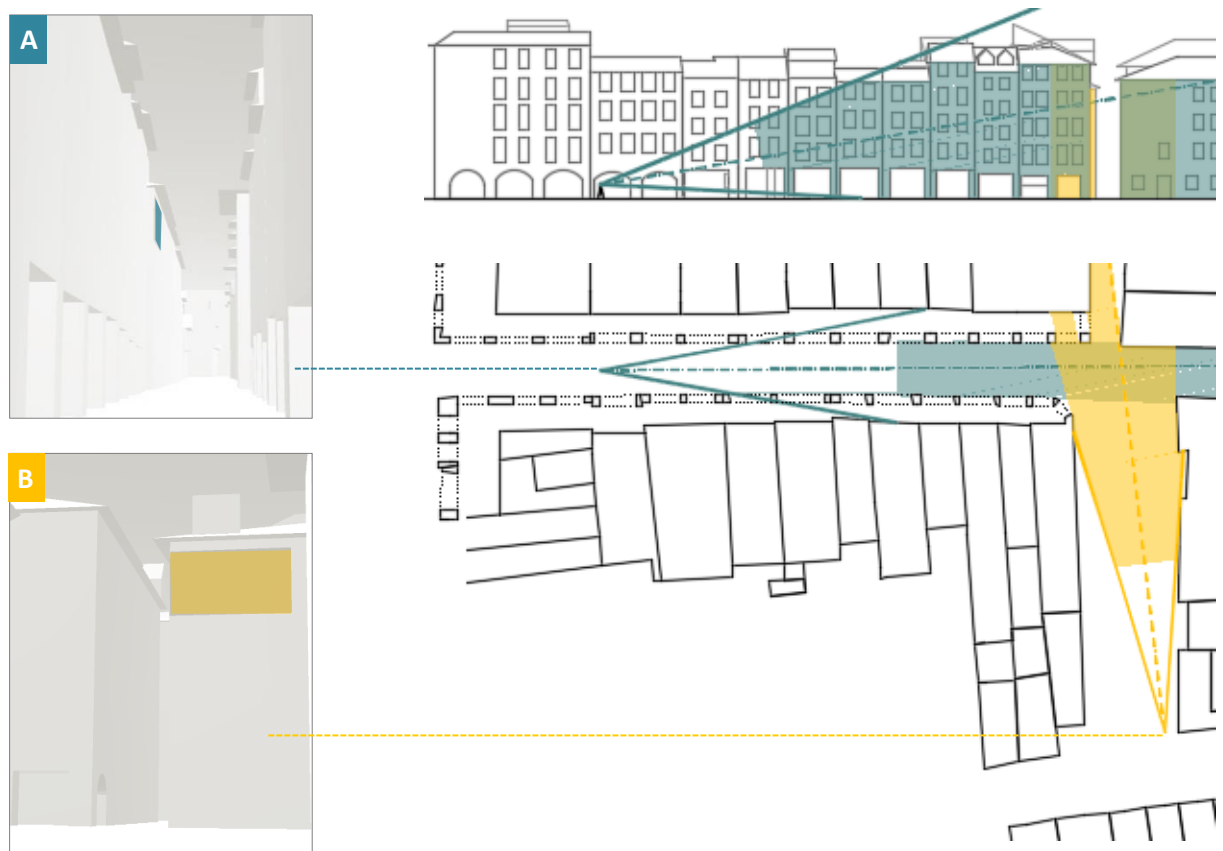


Figura 2. 31. Posición de las cámaras termográficas y visión del edificio objeto del estudio desde dicha posición en el modelo 3D del entorno de la Rue Tonneliers (Petit Bayonne).

Cada media hora, entre las 4:00h y las 22:00h (ST), se tomaron fotografías y termografías desde ambas cámaras simultáneamente. Todas las termografías obtenidas se calibraron para una emisividad igual a 1 y según las condiciones ambientales registradas *in situ* durante el test (temperatura del aire y humedad relativa).

Para evaluar el impacto de la variación angular de la emisividad sobre las temperaturas superficiales, se compararon los valores obtenidos en cada una de las cámaras para un área concreta de fachada. Para garantizar la comparabilidad de los resultados, fue necesario verificar que la zona de fachada analizada era la misma en ambas escenas termográficas. Para ello, se empleó un modelo 3D CAD del área de estudio (detalles en el *Capítulo 5*), sobre el que se definió una región de interés de 3x5.5m. A continuación, se incluyeron en el modelo 3D dos cámaras virtuales situadas en la misma posición que las cámaras térmicas para obtener imágenes de la región de interés vistas desde las cámaras virtuales (Figura 2.32). Dichas imágenes se utilizaron para seleccionar el área de píxeles equivalente en las termografías obtenidas de las cámaras infrarrojas A y B. Para cada una de las tomas, se calculó el promedio de temperatura superficial de dicha región de interés, parámetros de análisis en que se basó la comparación entre la cámara A y B.

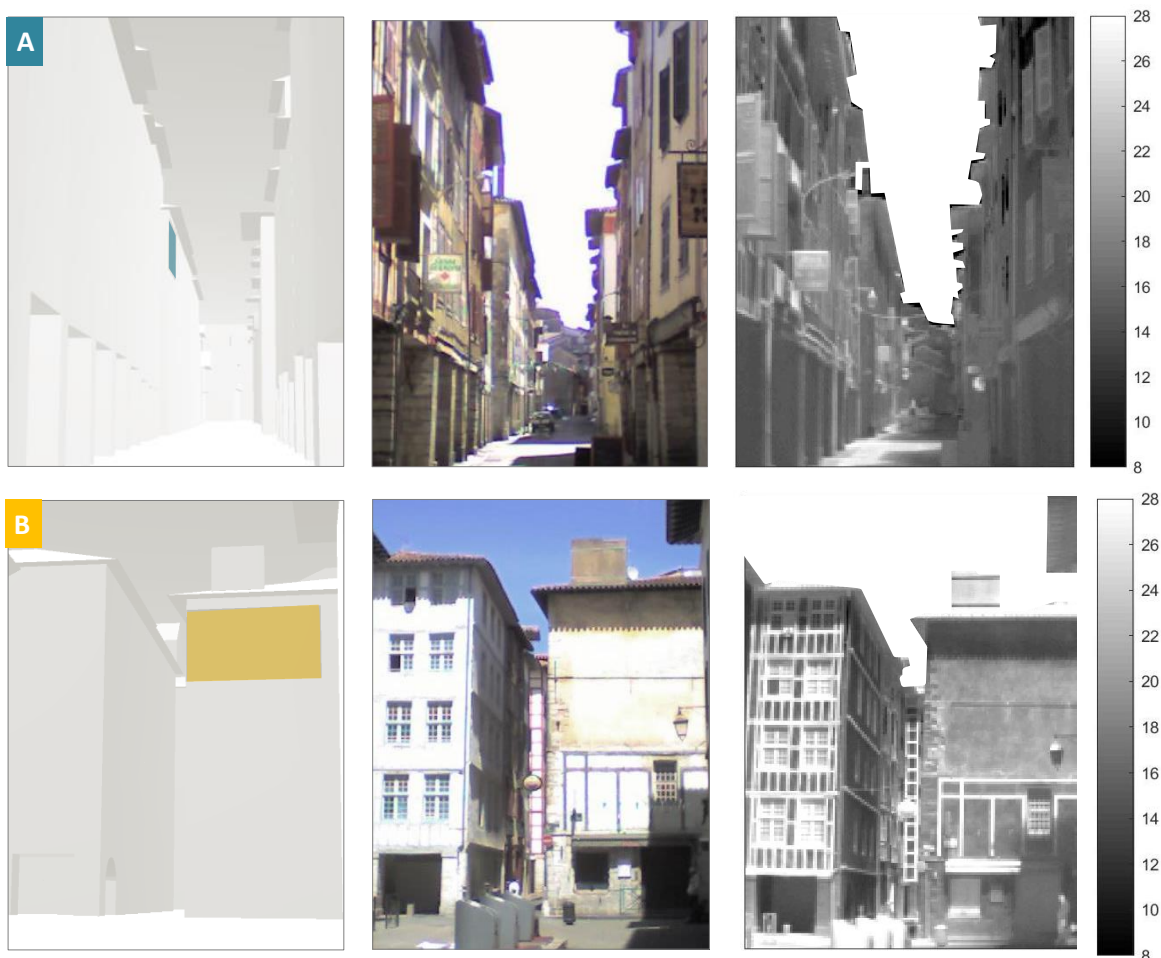


Figura 2. 32. Visión del edificio objeto del estudio en el modelo 3D, fotografía y termografía, desde un enfoque tangencial (cámara A, arriba) y frontal (cámara B, abajo).

Resultados

De la secuencia doble de termografías realizada, hemos seleccionado dos tomas para ilustrar los resultados obtenidos.

La primera de ellas fue realizada momentos antes de amanecer (4:00h ST), cuando prácticamente no había viento, la temperatura del aire era de 10.6°C y la humedad relativa del 75% (Figura 2.34). A simple vista se percibe que el área de interés parece estar más caliente en la escena frontal (predominan los tonos amarillos anaranjados) que en la tomada de manera rasante (dominan tonos azules verdosos). En este momento, la desviación de temperatura aparente entre ambas cámaras dentro de la región de interés (línea negra) fue de 1.7°C, máxima diferencia registrada durante la jornada.

La segunda toma seleccionada fue realizada a las 14:00 HS, en ausencia de viento, el aire estaba a 19.6°C y la humedad relativa al 59% (Figura 2.35). En este instante, una parte de la zona de fachada analizada está soleada y otra en la sombra de la cubierta, creándose un marcado contraste de temperaturas. Comparando la imagen frontal y la rasante, las diferencias entre ambas son apenas perceptibles a simple vista con la escala de color seleccionada, cuyos extremos se escogieron para poder visualizar el gradiente total de temperatura de la zona de análisis. De hecho, los resultados numéricos indican que la desviación de las temperaturas promedio entre la cámara rasante y la frontal es de 0.3°C.

En la Figura 2. 33, se muestra la evolución de la temperatura promedio de la que la zona de análisis extraída de la termografía con un enfoque en perspectiva (azul) y frontal (amarillo). En el caso de *Rue des Tonneliers*, vemos que la desviación de temperatura entre ambas cámaras oscila entre 1.7°C y 0.2°C.

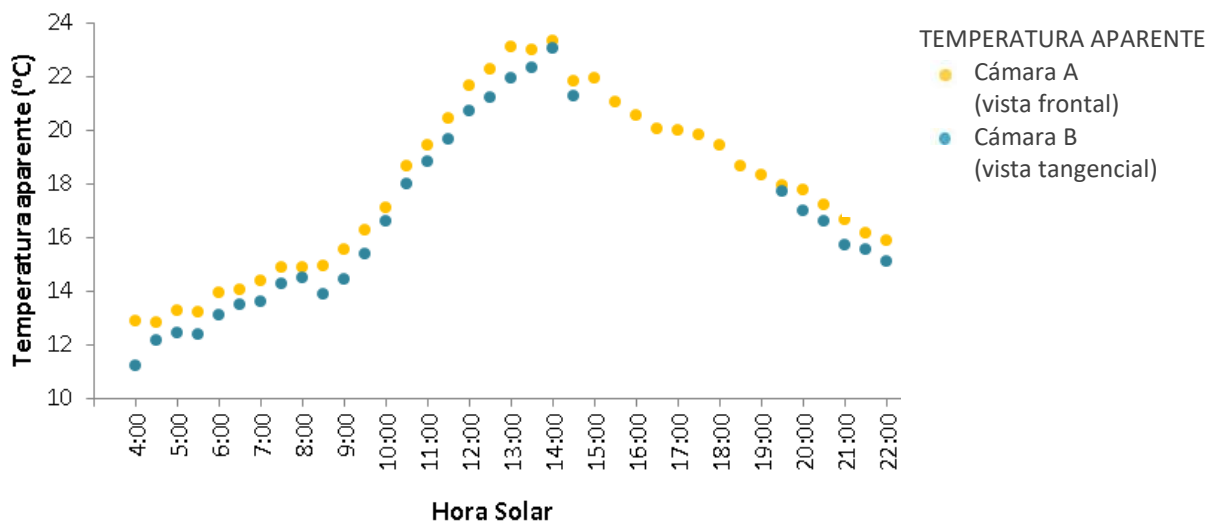


Figura 2. 33. Temperatura promedio de la zona de análisis desde un enfoque en tangencial (cámara A, azul) y frontal (cámara B, amarillo). Nótese que, entre las 15:00 y las 19:00, no se dispone de termografías válidas desde la cámara A.

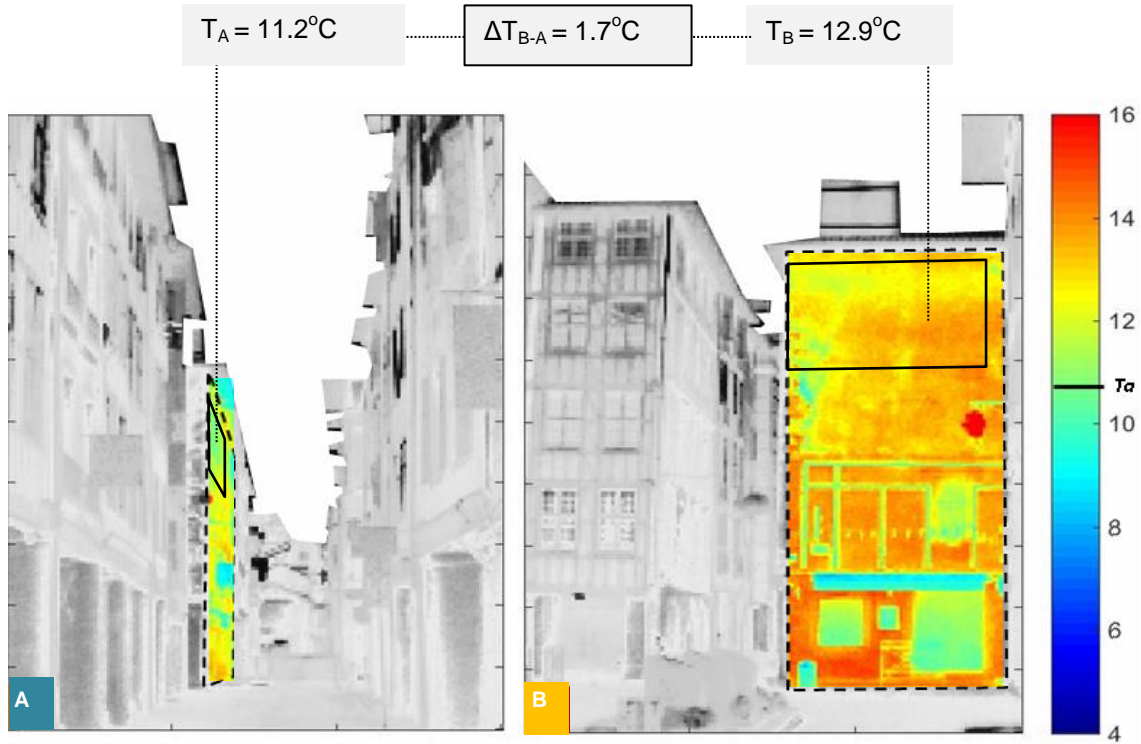


Figura 2. 34. Termografías del edificio-objeto de la segunda campaña de medición de la Rue des Tonneliers de Bayonne desde las cámaras A y B: 4:00h ST del 8/05/2017.

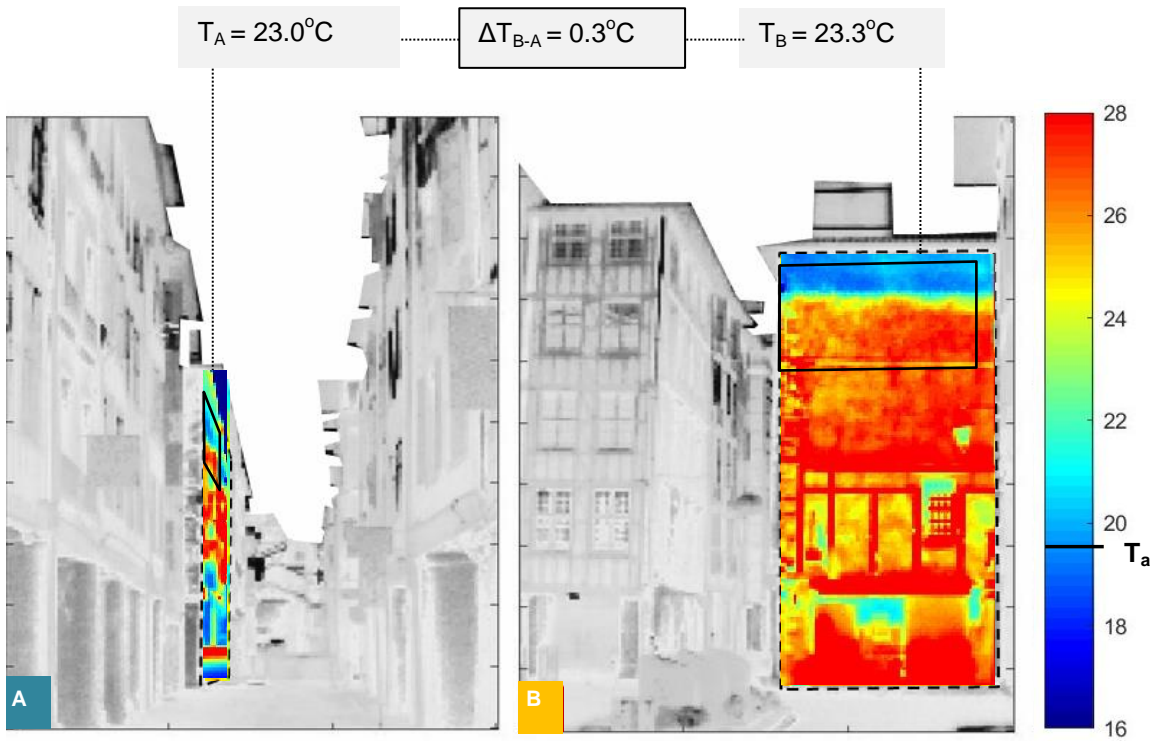


Figura 2. 35. Termografías del edificio-objeto de la segunda campaña de medición de la Rue des Tonneliers de Bayonne desde las cámaras A y B: 14:00h ST del 8/05/2017.

Observaciones finales sobre el caso de estudio

En este caso de estudio, una fachada Sur de una trama compacta ha sido termografiada bajo dos ángulos de observación: uno muy rasante, otro prácticamente frontal. Según nuestros resultados, las temperaturas aparentes obtenidas en dirección normal a la superficie de análisis son superiores a las obtenidas en dirección rasante. No obstante, las diferencias de temperatura encontrada son inferiores a 2°C (error similar a la precisión de la cámara termográfica). La limitada diferencia entre ambas mediciones (mucho menor que la encontrada en el anterior caso de estudio) puede explicarse por una combinación de causas geométricas y energéticas.

En entornos compactos, las fachadas “ven” gran cantidad de superficies construidas, y menor proporción de cielo (Figura 2. 36). Esto implica que, bajo ángulos de observación rasantes, donde la emisividad se reduce en favor de la reflectividad, la temperatura de la fachada mostrada en la termografía será – en parte - la temperatura reflejada de las superficies vecinas. Dado que las temperaturas de éstas son similares a las del objeto de medición, la desviación de temperatura asociada a la direccionalidad de la emisividad será débil.

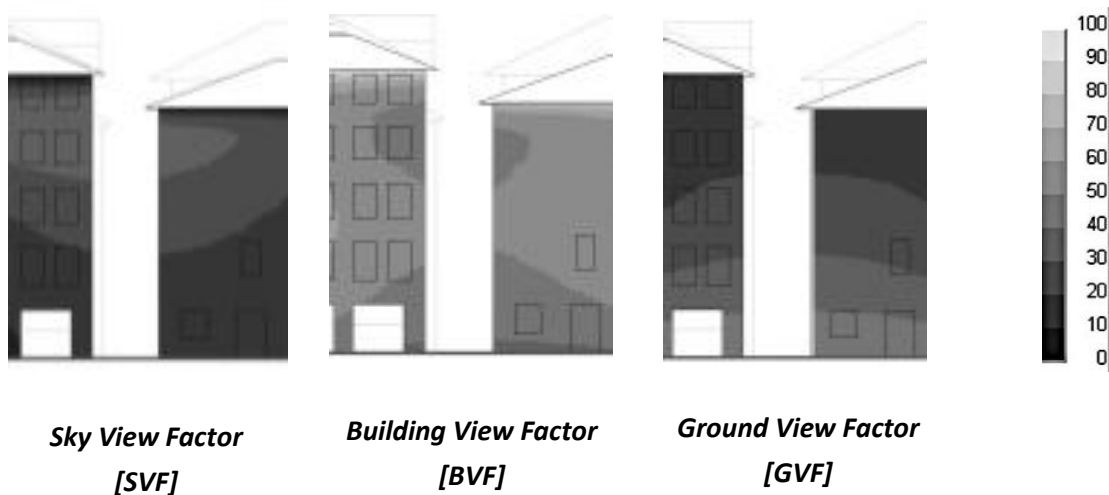


Figura 2. 36. Factor de vista fachada-cielo (SVF), fachada-fachadas (BVF) y fachada-suelo (GVF) del edificio objeto del estudio.

2.7 CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO

En este capítulo se comenzó **revisando los términos de la Ecuación de Balance de Energía** de una Superficie (SEB), para el caso de ambientes urbanos compactos. Se mostró que, en cañones urbanos donde las fachadas están muy próximas entre sí, el balance radiativo, término con gran peso dentro de la SEB, está muy afectado por las reflexiones de radiación tanto en ondas cortas como en ondas largas. La magnitud de dichas reflexiones está muy condicionada por aspectos geométricos (obstrucciones solares y factores de vista) y materiales (sobre todo, reflectancia y emisividad).

Dado que la ciudad es muy heterogénea material y geoméricamente, el valor de los flujos energéticos varía en cada punto y, con ello, el balance energético superficial. Este desigual balance se traduce físicamente en gradientes de temperatura sobre las superficies que, además, varían en el tiempo. En este sentido, las secuencias de termografías, como técnica que permite un análisis de temperaturas espacio-temporal, pueden ayudarnos a comprender los flujos de energía en ambiente construido.

A continuación, se realizó **una revisión bibliográfica sobre el empleo de la termografía** en el medio edificado. El estado del arte realizado mostró que esta técnica ha sido ampliamente empleada en este ámbito, para aplicaciones muy diversas, existiendo procedimientos especialmente bien definidos para los estudios a escala de elemento constructivo y de ciudad. En cambio, el uso de la termografía en escalas urbanas intermedias (a nivel de calle) es mucho más limitado.

Esta “infra-utilización” se asoció a la dificultad para extrapolar los procedimientos de otras escalas a la escala de calle y a la ausencia de metodologías de adquisición y tratamiento de los datos térmicos específicamente adaptados a las particularidades de esta escala. Si estos aspectos limitantes se superan, la termografía puede ayudar a la comprensión de los fenómenos energéticos que tienen lugar dentro del cañón, primera estructura construida con carácter plenamente “urbano”.

En el caso específico de los cañones compactos, la oclusión propia del entorno lleva a realizar las **termografías en perspectiva**, con objeto de abarcar el ámbito de estudio con el menor número de imágenes posible. Este enfoque, innovador dentro de lo realizado hasta el momento con termografía en ambiente urbano, plantea, sin embargo, ciertos retos a la hora de interpretar los resultados. El más importante es la desviación de temperatura entre la obtenida bajo un enfoque frontal y uno rasante, como consecuencia de los cambios en la emisividad en función del ángulo de observación.

Tras explicar las causas físicas de esta variación, se llevaron a cabo **dos trabajos experimentales** para cuantificar la influencia de este fenómeno sobre las temperaturas superficiales obtenidas mediante la termografía perspectiva.

- El primero se realizó en ambiente de laboratorio, con un gran diferencial de temperatura entre la pieza de estudio y su entorno. Bajo estas circunstancias, la variación angular de la emisividad se tradujo en notables diferencias de temperatura en función del ángulo de observación (hasta 10°C, para un ángulo de observación de 85°).

- En el segundo test, llevado a cabo en un cañón urbano compacto de la ciudad de Bayonne, la diferencia de temperatura entre los enfoques tangencial y normal, fue mucho menor (inferior a 2°C).

Las menores diferencias de temperatura registradas en los tests realizados en el cañón que en los llevados a cabo en laboratorio pueden explicarse por un efecto combinado entre los elevados factores de vista entre superficies construidas (bajo *Sky View Factor*) y la existencia de un menor diferencial de temperatura entre dichas superficies. Estos resultados nos permiten concluir que es posible emplear la termografía perspectiva para estudios térmicos a nivel de calle en entornos compactos, dado que la magnitud de los errores introducidos por la visión tangencial es limitada y del mismo orden que la precisión de la cámara.

METODOLOGÍA DE ANÁLISIS DE SECUENCIAS DE TERMOGRAFÍAS URBANAS

3.1 INTRODUCCIÓN

3.2 DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA METODOLOGÍA DE ANÁLISIS

3.3 PREPARACIÓN DE LA CAMPAÑA DE MEDICIÓN

3.4 RECOGIDA DE DATOS EXPERIMENTALES

3.5 PROCESAMIENTO DE IMÁGENES TERMOGRÁFICAS

3.6 ANÁLISIS DE RESULTADOS

3.7 DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

3.1 INTRODUCCIÓN

La adquisición de información sobre las temperaturas de las edificaciones urbanas, especialmente de su envolvente completa, representa una tarea de gran complejidad técnica y operativa (Voogt & Oke 1997). En entornos urbanos densos con morfologías muy ocluidas, típicos del área mediterránea y de los cascos históricos medievales europeos, estas dificultades se incrementan notablemente. Como consecuencia, hay poca disponibilidad de datos reales de temperatura superficiales a nivel de calle en este tipo de geometrías urbanas, especialmente de fachadas, a pesar de que representan una parte importante de la envolvente en el caso de la ciudad compacta (Figura 3. 1.).

En este capítulo se presenta una **metodología** para la adquisición y post-tratamiento de información sobre las temperaturas superficiales urbanas para la evaluación térmica a nivel de calle. **La metodología diseñada se basa en la técnica de la termografía infrarroja pasiva, con una toma de datos secuencial y manual (Ver Capítulo 2).** A partir de los datos de las mediciones, la aplicación de la metodología permite generar resultados gráfico-numéricos sobre los que se realizará un **análisis de tipo cualitativo-cuantitativo.**

Un aspecto clave sobre el método descrito es que su diseño se basó en la idea de **economía de medios técnicos y humanos**, buscando maximizar la información térmica obtenida del entorno construido con los mínimos recursos. Como condición de partida se impuso que, para la adquisición de datos experimentales, se contaría únicamente con una cámara comercial, un técnico y una jornada, recursos que podrían asimilarse a los disponibles al inicio de un proyecto.

El método descrito debe entenderse como una guía general que será particularizada a las condiciones específicas del caso de estudio seleccionado y a la finalidad del mismo. Para validar la aplicabilidad de la metodología en distintos contextos urbanos, ésta será aplicada en diversos casos de estudio. En el *Capítulo 4*, el método será empleado para la evaluación térmica, desde una posición estática, de dos cañones urbanos, uno en Córdoba y otro en Bayona. En el *Capítulo 5*, se evaluará un área urbana más extensa, estudiando diversos puntos de un recorrido que, en conjunto, proporcionan una visión térmica global del tejido.

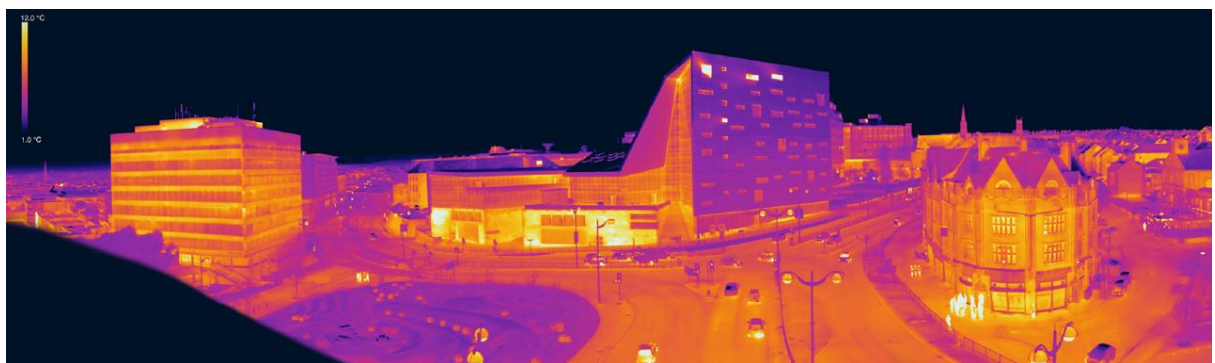


Figura 3. 1. Ejemplo de termografía de fachadas en entorno urbano poco denso. Campus de la Universidad de Plymouth.

Fuente: (Fox et al. 2014)

3.2 DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA METODOLOGÍA DE ANÁLISIS

En esta sección se presenta el esquema general de la metodología utilizada en la tesis para el análisis de las temperaturas de superficies urbanas haciendo uso de la termografía. Como se muestra en la Figura 3. 2, la metodología diseñada consta de cinco fases, que serán descritas en detalle en los siguientes epígrafes.

En la primera fase, se desarrollarán los trabajos previos necesarios para la realización de la campaña de medición. En la segunda, se llevará a cabo la recogida de datos, que comprende la toma de imágenes y de diversos parámetros ambientales. En una tercera etapa, dichos datos serán procesados para producir resultados gráficos y numéricos. Éstos serán analizados desde una perspectiva cualitativa-cuantitativa en la cuarta fase del método. Finalmente, se extraerán conclusiones sobre el ambiente térmico a nivel de calle.



Figura 3. 2. Esquema de la metodología de análisis.

3.3 PREPARACIÓN DE LA CAMPAÑA DE MEDICIÓN

3.3.1 Selección de punto/s de medición

En esta fase, se engloban los análisis previos para la selección de las escenas urbanas a estudiar y la posición de los puntos de medición. Se trata de una etapa crítica del trabajo, pues condiciona de forma significativa tanto la aplicabilidad de la metodología como la representatividad de los resultados.

A la hora de elegir el/los punto/s de medición debe buscarse un equilibrio entre **tres aspectos**, a menudo enfrentados:

[Representatividad de la escena enfocada]

Desde los puntos de medición seleccionados, deben encuadrarse escenas urbanas con características representativas de la trama en que se insertan, para permitir que las conclusiones del estudio sean extrapolables a escala de tejido. Además, dado que este tipo de estudios implica la movilización de unos medios técnicos y humanos, las posibilidades de replicación extensiva del estudio se limitan, convirtiendo la representatividad de la ubicación escogida en una prioridad. Deberán evitarse, por tanto, aquellos puntos desde los que enfoquen escenas urbanas donde elementos urbanos temporales (ej. edificio en construcción) o excepcionales dentro de la trama urbana (ej. estrechamiento puntual de una calle) sean los protagonistas.

[Operatividad del emplazamiento]

Las mediciones en ambientes urbanos - y más aún si éstas se realizan a nivel de la calle-, plantean notables dificultades operativas. En los entornos urbanos, cambiantes y en incesante movimiento, la toma continuada de medidas es compleja por diversos motivos. Uno de ellos es la variabilidad de la propia escena (la gente pasa, las protecciones solares se mueven...), en la que los elementos enfocados varían (aparecen, desaparecen, son enmascarados...). Otra de las principales dificultades es el tráfico de vehículos (incluso en calles con prioridad peatonal), que limita en gran medida los emplazamientos factibles en los que realizar medidas.

La toma de datos en cada punto de medición tendrá una duración de varios minutos. Esto implica que las localizaciones escogidas deben permitir mantener la cámara en la posición escogida durante este tiempo, sin suponer una molestia para el peatón (ej. entrada a tiendas), un riesgo para el investigador (ej. tráfico), ni un problema para el análisis (ej. existencia de obstrucciones visuales). Este aspecto será uno de los principales condicionantes para la planificación de las mediciones.

[Interrelación entre los medios técnicos disponibles y las características del entorno]

Los objetos enfocados en una imagen termográfica dependen de la interacción entre la geometría del entorno de medición y las características de la cámara, especialmente su resolución infrarroja y su campo de visión (FOV).

En nuestro caso, dado que nos interesa analizar los cambios térmicos de las fachadas, sería conveniente poder encuadrarlas en toda su altura. En este sentido, las cámaras con mayor campo de visión resultan interesantes, especialmente las denominadas de *gran angular*. Esta **relación geometría del entorno – campo de visión de la cámara (FOV)**, constituye un aspecto limitante a la hora de seleccionar el punto de medición. Cuanto menor sea el campo de visión de la cámara (FOV), más habrá que alejarse del objeto de estudio para poder retratarlo en toda su dimensión (Figura 3. 3) y viceversa. Dentro de un cañón urbano, esto equivale a decir que la calle debería tener una longitud suficiente como para alejarse hasta enfocar la fachada completa.

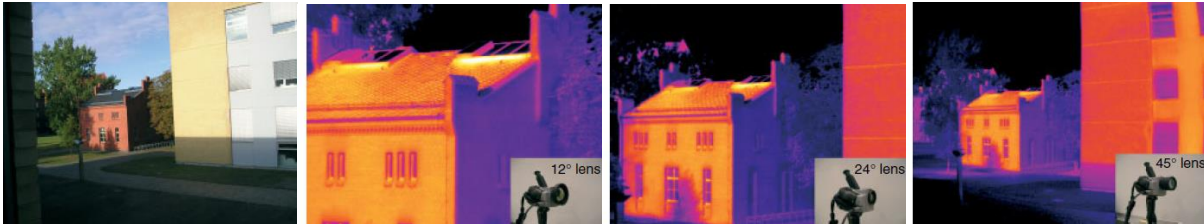


Figura 3. 3. Termografías realizadas desde un mismo punto de medición con cámaras de diferentes campo de visión (FOV)
Fuente: (Vollmer & Möllmann 2010).

Otro aspecto importante a tener en cuenta es la relación entre el **campo de visión (FOV) y la resolución IR de la cámara**. Este aspecto afectará la “nitidez térmica” de la escena encuadrada y, con ello, a nuestra capacidad de estudiar la temperatura de elementos concretos evitando la interferencia entre objetos adyacentes. Como ejemplo de ello, la Figura 3. 3 muestra dos termografías tomadas por cámaras con el mismo campo de visión (FOV) pero diferente resolución. Esta metodología se basa en la realización de imágenes urbanas en perspectiva, lo que implica que el tamaño “aparente” de las superficies se reduzca notablemente en la dirección de profundidad de la imagen. Por este motivo, la resolución resulta un factor a considerar en función del tipo de análisis a realizar. Con bajas resoluciones, se podrán proporcionar valores globales promedio de las superficies, pero para estudios de detalle será necesario contar con cámaras de mayor resolución.

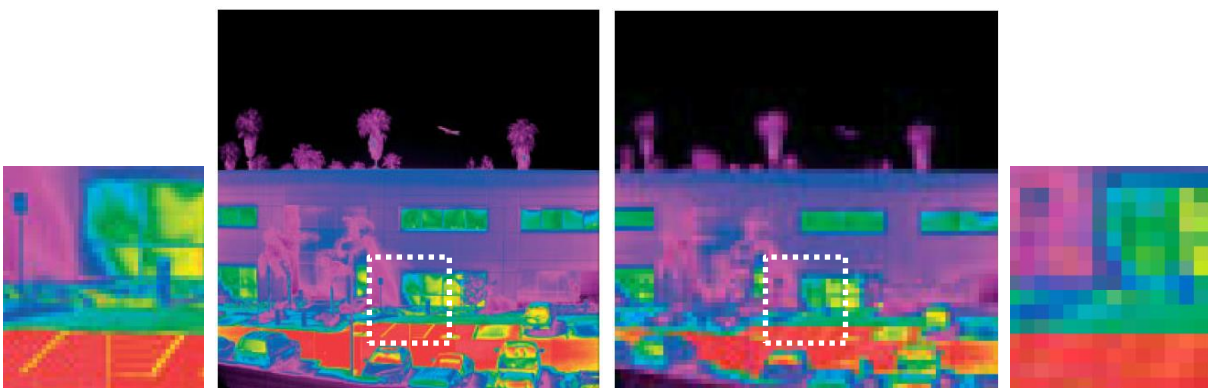


Figura 3. 4. Termografías con igual campo de visión (FOV) y diferente resolución IR:
1024 x 1024 (izquierda) 80 x 80 (derecha). Fuente: (Vollmer & Möllmann 2010).

3.3.2 Temporalización de las mediciones

Dos requerimientos guiarán la temporalización las mediciones. En primer lugar, las tomas deben programarse de tal forma que la información obtenida permita la “reconstrucción” de la evolución térmica de las superficies durante la jornada, a partir de un número limitado de imágenes.

En segundo lugar, la temporalización de tomas ha de ser compatible con la ubicación y el número de puntos de medición. Teniendo en cuenta que se dispondrá únicamente de una cámara y un técnico, existirá una correlación inversa entre el número de tomas y el número de puntos de medición. Así pues, para respetar dicha condición de partida, si la finalidad del estudio es el seguimiento pormenorizado de la evolución temporal de la temperatura de las superficies, habrá necesariamente que limitar el número de puntos de medición. Si, por el contrario, se pretende estudiar un área urbana de mayor extensión, se maximizarán los puntos de medición, pero será necesario distanciar más en el tiempo la toma de imágenes.

En definitiva, el número de localizaciones y la distancia entre ellas deben definirse de tal forma que el tiempo necesario para recorrerlas y realizar la medición sea menor que el tiempo entre tomas consecutivas. Para comprobar que esto sucede, se procederá de la siguiente manera.

Por lado, se definirán varios **momentos de interés** a lo largo de la jornada para realizar la **toma de imágenes**, según los siguientes criterios:

- Las medidas comenzarán repartiéndose **simétricamente** desde el mediodía solar, concentrándose más en torno a las 12:00h solar (máx. irradiancia solar horizontal) y pudiendo espaciarse más durante las primeras y últimas horas del día.
- Se añadirán **2 tomas adicionales**: una, una hora antes del amanecer, para recabar información en el momento del día más cercano al estado estacionario. Otra, dos horas después del anochecer, para estudiar los posibles efectos de la inercia en los materiales.
- El **tiempo entre tomas (t)** será mayor de **30 minutos**. Autores como (Lehmann et al. 2013; Fox et al. 2015), mostraron que tomar imágenes en intervalos de tiempo inferiores multiplica la cantidad de material a procesar sin añadir información relevante, ya que las variaciones de temperatura que experimentan los elementos constructivos son poco significativas.

Por otro lado, se calculará la **duración de la ronda de medición (d)**. Para ello, se sumará el tiempo necesario para llevar a cabo la toma de imágenes (en nuestro caso, ≈ 1 min/punto) al tiempo requerido para ir de un punto de medición al siguiente y volver al comienzo del recorrido una vez que se haya realizado la última medición (en nuestro caso, a razón de ≈ 85 m/min o ≈ 5 Km/h).

Finalmente, se comprobará que la **duración de la ronda (d) sea menor que el tiempo entre las dos tomas más próximas entre sí (t)**.

Una vez comprobado que $d < t$, se programará la **hora de inicio de las distintas rondas de medición**. Cada ronda comenzará $d/2$ antes de cada uno de los momentos de interés definidos. De esta manera, se minimizará la diferencia temporal entre el momento de interés y la hora real de cada toma.

3.3.3 Modelización del entorno urbano

En esta fase, se levantará un **modelo geométrico 3D del entorno urbano** de estudio. El modelo a realizar será **de tipo morfológico**, es decir, un modelo donde se reproduce la forma real de la trama y no una abstracción tipológica de la misma (Curreli 2016).

Un aspecto importante del modelado será el **nivel de detalle** del mismo (Figura 3. 5), entendido tanto desde el punto de vista geométrico como material. Dada la elevada sensibilidad de la radiación solar a aspectos geométricos, el nivel de detalle mínimo recomendable para el modelo sería el de **LOD2.1**, cuyas características describen Biljecki et al. (2016). A este nivel, los edificios son modelados especificando su altura individualmente, incluyendo aquellos elementos con una dimensión superior a 2m o una superficie mayor de 2m^2 y las superestructuras de cubierta (ej. grandes chimeneas o torreones...).

En función de la finalidad del estudio, puede ser recomendable levantar un modelo con un mayor nivel de detalle. Aunque la información que de él puede obtenerse y la precisión de la misma aumentan, el coste de realización también lo hace, por lo que habrá que buscar un equilibrio entre ambos factores. Para estudios más detallados dentro del cañón urbano, resulta especialmente interesante el nivel de detalle **LOD3.1**, definido por Biljecki et al. (2016), ya que en él se incorporan elementos que pueden tener una notable influencia sobre aspectos radiativos:

- Las estructuras de cubierta como voladizos de tejados o los balcones ($>0.2\text{m}$), volúmenes que pueden afectar notablemente al patrón de sombras y la visión del cielo en fachada;
- Las aberturas en fachada (puertas y ventanas con una superficie $>1\text{m}^2$), cuyas propiedades ópticas diferenciadas pueden influir significativamente sobre la radiación reflejada el interior del cañón urbano.

Otro aspecto a tener en cuenta es la semántica incorporada en el modelo geométrico 3D, ya que condiciona la información que puede generarse a partir del mismo. En este sentido, las características materiales a incorporar en el modelo son:

- **Propiedades ópticas de las superficies que limitan el cañón:** coeficiente de reflexión ($r\%$) y emisividad ($\epsilon\%$). Dado que ambos aspectos han demostrado tener gran influencia sobre la información obtenida en la termografía, la definición de unos valores aproximados a la realidad es un aspecto a tener en cuenta, pudiendo conllevar la realización de mediciones *in-situ*.
- **Propiedades térmicas de los elementos constructivos que limitan el cañón:** conductividad térmica k (W/mK), capacidad calorífica C ($\text{J/m}^3\text{K}$) y difusividad térmica d (m^2/s), a partir de las cuales se obtienen la transmitancia térmica U ($\text{W/m}^2\text{K}$) y la inercia μ ($\text{J/m}^2\text{Ks}^{1/2}$).

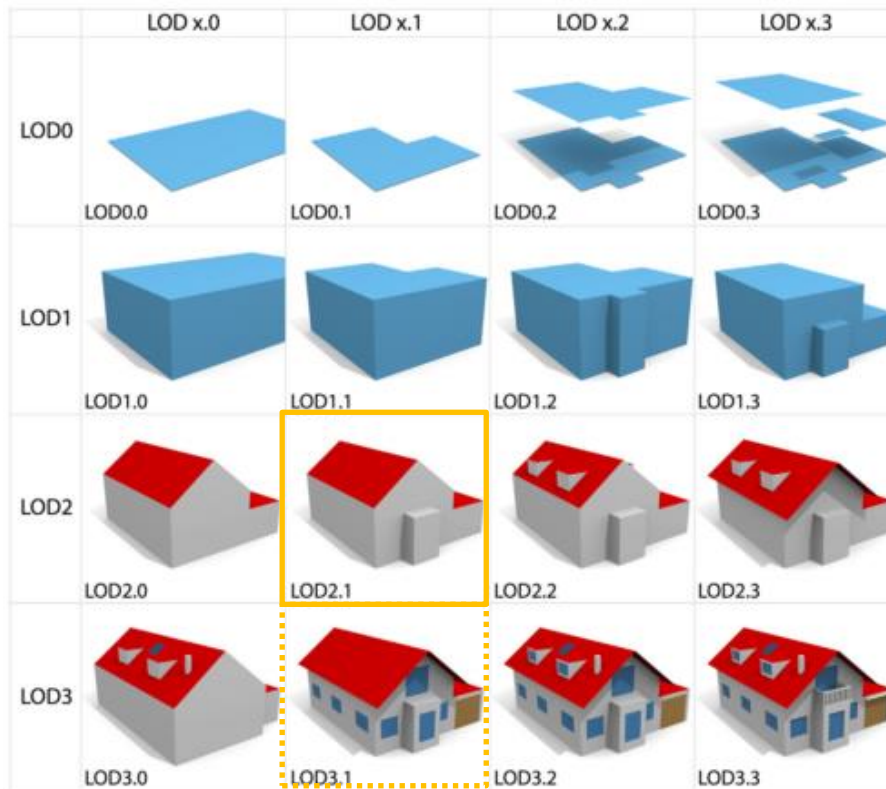


Figura 3. 5. Nivel de detalle refinado para un edificio residencial según Biljecki et al. (2016).

Una vez generado este modelo, podrá ser utilizado para extraer información adicional que ayude a la interpretación y discusión de los resultados de la medición. En nuestro caso, el modelo se utilizará para:

- **Caracterizar el entorno urbanos de estudio**, desde una doble perspectiva:
 - **Geométrica:**
A partir de los *factores de vista*, tanto entre las superficies y el cielo (*Sky View Factor*) como entre éstas (*Ground View Factor*, *Building View Factor*), un parámetro que ayudarán a interpretar los intercambios radiativos difusos. En esta tesis, estos indicadores se calculan empleando el software **HELIODON 2** (Beckers & Masset 2006), una herramienta que proporciona tanto valores puntuales de factores de vista de cielo, como mapas con su distribución espacial sobre las superficies del modelo.
 - **Material:**
En base a la información semántica y espacial contenida en el modelo, se calculó manualmente la reflectividad promedio del entorno y la tasa de acristalamiento (WWR), parámetros influyentes en la magnitud de las reflexiones de radiación en el entorno construido.

- **Simular flujos de energía** (radiación / conducción / convección):

En esta tesis, el modelo desarrollado se empleará para la **simulación de la radiación en ondas cortas** incidente sobre las superficies. Se trabajará con dos niveles de precisión, en función del nivel de detalle del modelo y la herramienta de simulación elegida:

- **HELIODON 2** (Beckers & Masset 2006) se utilizará para realizar cálculos de aportes solares sobre las superficies de modelos de una manera simplificada, teniendo en cuenta sólo la componente directa de la radiación y, en alguna ocasión, para evaluar los Factores de Vista del Cielo (en inglés: *Sky View Factor*, SVF) desde las fachadas. HELIODON 2 es una **herramienta para el diseño interactivo** con la radiación solar, tanto a la escala arquitectónica como a la escala urbana (Beckers & Rodriguez 2009). Esta herramienta permite producir interactivamente en cada punto de la escena estudiada un diagrama solar con las máscaras de su entorno. Esta proyección estereográfica puede transformarse en proyección isócrona (respeto de los intervalos de tiempo), equivalente (respeto de ángulos sólidos) o proyección ortogonal (respeto de los factores de vista).

En HELIODON 2, la radiación incidente sobre las superficies se calcula según el **modelo de cielo despejado (Liu & Jordan 1960)**, teniendo en cuenta para los cálculos del flujo solar la transmisividad de la atmósfera y el espesor de la misma atravesado por los rayos solares. Integrando el flujo solar en los intervalos de tiempo definidos por el usuario (año, estación, mes, hora, día), esta herramienta proporciona información gráfica y cuantitativa sobre la radiación recibida (kWh/m^2), pudiendo obtenerse mapas de la radiación incidente sobre las superficies de la escena (Beckers & Rodriguez 2009).

- **RADIANCE** (Ward Larson & Shakespeare 1998) se empleará para realizar cálculos más precisos de radiación solar, considerando la componente directa, difusa y reflejada. **RADIANCE** es la herramienta de referencia para la simulación de ondas cortas¹. Es un software libre que permite realizar simulaciones de luz y renderización realista. El método de cálculo que emplea **RADIANCE** es el **Backward Ray Tracing**. A pesar de pertenecer a la familia de software de trazado de rayos, esta herramienta es capaz de simular tanto radiación difusa como especular, siendo el número de reflexiones (en inglés: *bounces*) un parámetro clave en el equilibrio precisión - tiempo de cálculo.

¹ RADIANCE cuenta con una gran comunidad de usuarios; investigadores reconocidos en el campo basan en él sus trabajos, como John Mardaljevic (Mardaljevic 1999) y Christoph Reinhart (Reinhart & Walkenhorst 2001); y está presente en la gran mayoría del software de simulación de iluminación natural de edificios, como Ecotect, DesignBuilder, Daysim o DIVA.

Para modelar la **radiancia de la bóveda**, RADIANCE permite emplear modelos de **cielo estándar C.I.E**, el modelo *Perez All – Weather* y modelos de cielo a partir de **datos climáticos** (CBDM), utilizados conjuntamente con el método de *Daylighting coefficients* (Tregenza & Waters 1983).

Para lanzar la simulación en RADIANCE, es necesario especificar los coeficientes de absorción, reflexión y transmisión de los materiales del modelo (aún no definidos en la fase inicial de proyecto). Por otra parte, los tiempos de cálculo pueden ser considerables (del orden de varias horas). Por ello, las posibilidades de utilización de este software tanto para el diseño de proyectos como para el cálculo radiativo a escala urbana son limitadas fuera de la investigación.

Sobre el modelo 3D desarrollado, podría asimismo calcularse el balance energético completo, detallado en el *Capítulo 2*, y utilizar esta información para generar mapas de distribución de las temperaturas superficiales o *termografías simuladas*.

Las herramientas actuales de simulación energética a escala de edificio o tejido urbano, basadas mayoritariamente en métodos nodales (ej. Citysim o EnergyPlus), son capaces de proporcionar valores promedio de temperatura superficial resultantes del balance energético completo. Sin embargo, la drástica simplificación geométrica inherente a este tipo de métodos les impide “espacializar” las temperaturas y, por tanto, llegar a producir *termografías virtuales*.

La simulación de termografías exige mallar la superficie y los volúmenes del modelo para poder calcular los gradientes de temperatura dentro de los sólidos y emplear métodos de cálculo tipo elementos finitos (en inglés, *Finite Element Method*, FEM). Estos métodos son ya habituales en muchos campos de la ingeniería, incluyendo la térmica, normalmente sobre elementos con una escala espacial y una complejidad material limitada, como motores, satélites, etc. (Lewis et al. 2004). Sin embargo, su aplicación en ambientes urbanos, heterogéneos en su materialidad y de gran complejidad geométrica, constituye actualmente un área de investigación en desarrollo y que sale del alcance de esta tesis.

3.4 RECOGIDA DE DATOS EXPERIMENTALES

3.4.1 Toma de imágenes termográficas y fotográficas

El día elegido para la campaña de medición, se llevará a cabo la toma de imágenes termográficas y fotográficas en los puntos seleccionados, con la temporalización establecida en la fase de preparación. Para minimizar el desplazamiento entre las imágenes de las distintas tomas, se llevarán a cabo las siguientes medidas:

- **Crear un “conjunto monolítico” cámara-trípode.** La cámara térmica se fijará al trípode mediante la zapata. La posición de la cámara con respecto al plano horizontal se bloqueará gracias a la rótula superior (habitualmente, con una ligera elevación respecto al plano horizontal para enfocar las fachadas de manera adecuada). Asimismo, se fijarán el ángulo y extensión de las patas y la altura de la columna central del trípode.
- **Marcar la ubicación del trípode sobre el pavimento.** La forma de marcar la posición deberá adecuarse a las características del pavimento y asegurar que ésta no desaparezca durante la campaña. En nuestro caso, se usaron rotuladores específicos para materiales pétreos, así como cinta adhesiva resistente a altas temperaturas.
- **Referenciar la posición de la cámara, mediante tres parámetros:** distancia a elementos construidos fijos de las patas del trípode, altura respecto al plano horizontal y ángulo de inclinación de la base de la cámara.
- **Identificar la posición de tres referencias visuales dentro de cada escena urbana.** En la primera toma de imágenes, se marcarán sobre una tarjeta transparente colocada sobre el visor de la cámara tres referencias visuales, coincidiendo con puntos reconocibles de la escena urbana enfocada.
- **Seleccionar el modo de disparo** de la cámara térmica en que se realiza de forma simultánea una fotografía y una termografía de la escena encuadrada, y realizar la primera toma de imágenes. En tomas sucesivas, se utilizarán las tarjetas transparentes de referencia para comprobar que el encuadre de la toma actual se ajusta al que se realizó en la primera ronda (Figura 3. 6).

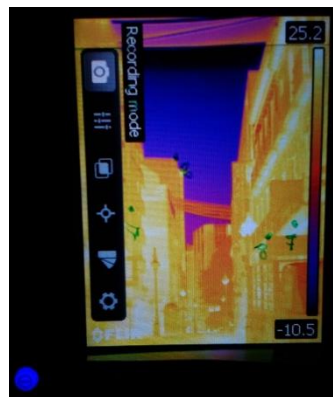


Figura 3. 6. Ejemplo de tarjeta de referencia empleada para la medición.

3.4.2 Registro de condiciones ambientales

Los resultados de la termografía están estrechamente relacionados con las condiciones ambientales presentes durante y antes de la medición. Por ello, para una correcta interpretación de los datos obtenidos, se registrarán las siguientes variables ambientales:

- Temperatura del aire
- Humedad relativa
- Velocidad del viento
- Radiación solar sobre plano horizontal

Los tres primeros parámetros deben ser medidos *in-situ*, dada la gran variabilidad espacial que pueden presentar.

La **temperatura y humedad relativa** del aire se registrarán con ayuda de un termo-higrómetro ubicado cerca de la cámara termográfica y protegido de la radiación solar. Como mínimo, debe registrarse la temperatura y humedad a la hora en que se realizan las imágenes termográficas, datos necesarios para el calibrado de imágenes. Sin embargo, de cara al análisis de los resultados, resulta interesante disponer de información de estas variables de forma más continuada a lo largo de la jornada de medición.

Para la medición de la **velocidad del viento**, se empleará un anemómetro capaz de tomar registros no condicionados por la dirección del mismo (ej. anemómetro de hilo caliente). El sensor del dispositivo se situará lo más centrado posible con el eje de la calle y a una altura de 2.5m sobre el nivel del suelo, para evitar obstáculos como peatones o vehículos. Los valores de velocidad del viento se registrarán cada 2s, al menos durante 5 minutos, en cada localización para valorar la existencia de rachas puntuales. Este parámetro ambiental afecta a la magnitud de los intercambios por convección, pudiendo influir sobre los resultados de las termografía. Por ello, diversos autores (Kylili et al. 2014; Vollmer & Möllmann 2010) recomiendan no realizar mediciones si la velocidad del viento supera de manera continuada el valor de referencia de 1 m/s.

Los datos de **radiación solar**, menos afectados por las variaciones espaciales, se tomarán de la estación meteorológica más próxima disponiendo de un piranómetro que proporcione valores de irradiancia global horizontal. La aproximación entre los valores in situ y en estación meteorológica será aceptable en los casos extremos, con cielos completamente despejados o cubiertos.

3.5 PROCESAMIENTO DE IMÁGENES TERMOGRÁFICAS

El software comercial de las cámaras termográficas permite importar y visualizar imágenes radiométricas, ajustar los parámetros ambientales y consultar las temperaturas puntuales o promedio de ciertas áreas de la imagen (FLIR-Systems 2018). Sin embargo, dichas funcionalidades están disponibles, generalmente, sólo para imágenes individuales. Dado que en este trabajo se analizarán secuencias de termografías, se diseñó un procedimiento específico combinando el programa comercial de la cámara con la programación ad-hoc de una serie de rutinas (Figura 3. 7).

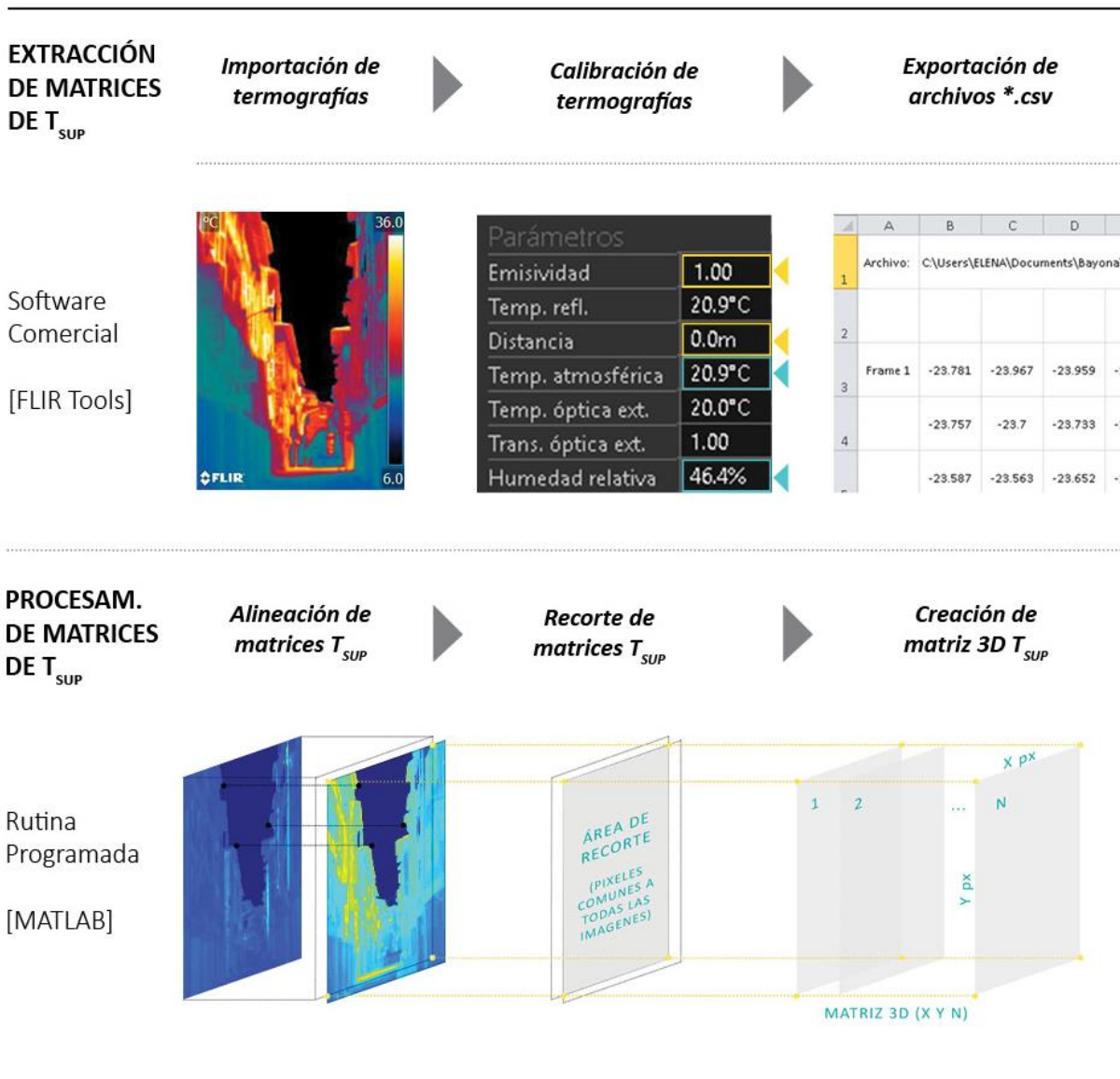


Figura 3. 7. Flujo de trabajo para el procesamiento de datos de temperatura superficial.

[Extracción de matrices de temperatura]

El procesamiento de los datos comienza con la extracción de la información numérica contenida en las termografías. Para ello, se realizarán tres acciones en el software comercial de la cámara:

- **Importación de las termografías:** en formato de archivos **.jpg*.
- **Calibración de las imágenes:** con los valores indicados en la Tabla 3. 1. El valor de la emisividad se fijará en 1, quedando el efecto del parámetro *temperatura reflejada* neutralizado. Por tanto, los resultados se expresan en términos de *Temperatura Aparente* (Vollmer & Möllmann 2010). La distancia será fijada en 0m, para anular el efecto de las correcciones atmosféricas. La temperatura y la humedad relativa se tomarán de los datos ambientales medidos durante la campaña.

PARÁMETRO	VALOR
Emisividad	1.00
Distancia	0 m
Temperatura atmosférica	<i>Datos ambientales medidos</i>
Humedad relativa	<i>Datos ambientales medidos</i>
Temperatura Reflejada	<i>Indiferente</i>

Tabla 3. 1. Calibración de parámetros a realizar en todas las imágenes.

- **Exportación de las matrices de temperaturas** asociada a cada una de las imágenes de la secuencia en formato **.csv*. El tamaño de la matriz vendrá determinado por la resolución térmica de la cámara, con tantos datos de temperatura como el producto de sus dimensiones (ej. imagen 150 x 200 = 30.000 datos de temperatura).

[Procesamiento de matrices de temperaturas]

La segunda fase del procesamiento de los datos consistirá en el tratamiento de las matrices de temperaturas para producir la información en la que se basará el análisis espacial y temporal de los resultados. Para ello, se programaron rutinas en lenguaje Matlab 2017b, cuyo código se incluye en el Anexo C. Este procesamiento inicial de los datos consta de tres subrutinas con la siguiente función:

- **Alineado de las imágenes.** Las imágenes son desplazadas y/o rotadas hasta quedar alineadas con la imagen de referencia, mediante la función *imregister* de Matlab, en modo de transformación *rigid*.
- **Recorte de imágenes,** para asegurar que los píxeles contenidos dentro de los nuevos límites son comunes a todas las imágenes de la secuencia. Este proceso conlleva una inevitable pérdida de información, que variará en función del desplazamiento relativo entre las tomas. Se cuantificará el % de información conservada, aspecto que se utilizará para discutir validez de la metodología diseñada. La función de Matlab utilizada será *crop*.
- **Creación de matriz 3D** (*multi-array* en Matlab), formada por la superposición ordenada de las matrices 2D de temperaturas de las imágenes que forman la secuencia, una vez recortadas.

3.6 ANÁLISIS DE RESULTADOS

Los resultados de las mediciones son analizados desde una perspectiva cualitativa-cuantitativa basándose en imágenes y gráficos numéricos. Las temperaturas superficiales de la escena serán valoradas, por tanto, tanto espacial (distribución) como temporalmente (evolución).

3.6.1 Análisis basado en imágenes

Empleando varias subrutinas (Anexo C), se crean imágenes coloreando las matrices de temperaturas extraídas de las termografías con diferentes escalas, elegidas por el usuario según el objetivo del análisis:

- **Secuencia de termografías con escala de temperatura común a todas las imágenes, para evaluar espacial y temporalmente la distribución de temperaturas a lo largo de un periodo de tiempo.** La rutina genera “máscaras” que permiten identificar los píxeles fuera de rango y reajustar la escala en consecuencia. (Figura 3. 8).

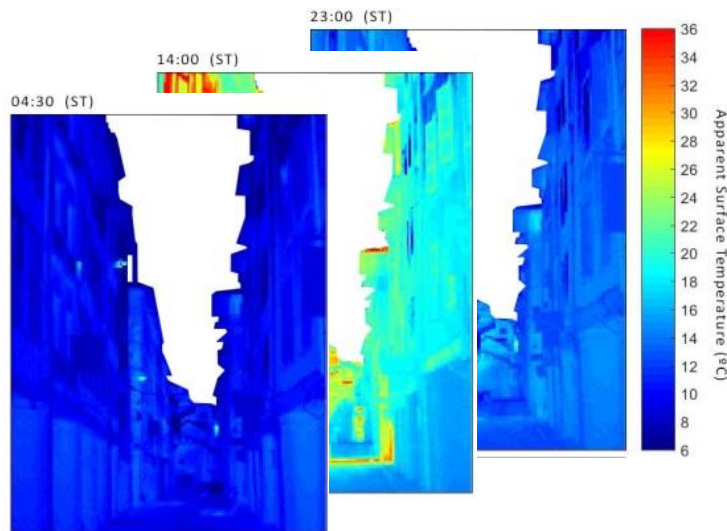


Figura 3. 8. Ejemplo de secuencia termográfica con escala común de cañón urbano, donde los píxeles fuera de rango se dejan en blanco.

- **Termografías con escala de temperatura individual, para estudiar un fenómeno en una toma concreta de la escena urbana al completo o bien de una zona de la misma.** Un rango de temperatura más estrecho maximiza la observación de detalles (Figura 3. 9).

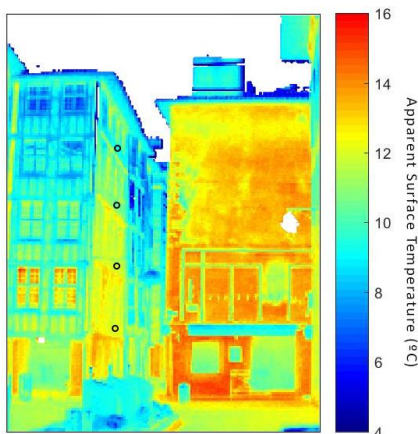


Figura 3. 9. Ejemplo de termografía con escala de temperatura individual de escena urbana completa.

- **Imágenes con escala de temperatura relativa.** Las termografías pueden colorearse con una escala que refleje diferencial entre la temperatura de la superficie y otra temperatura definida por el usuario, por ejemplo, la del aire (Figura 3. 10).

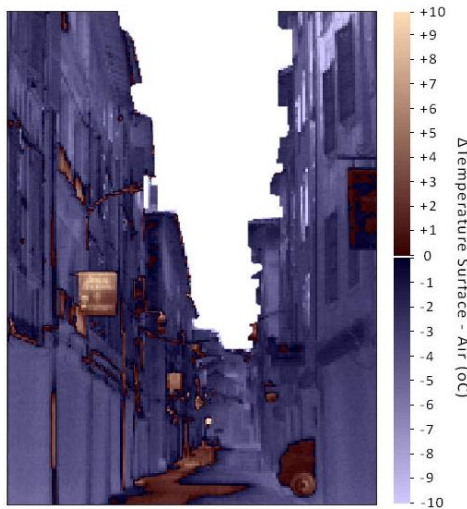


Figura 3. 10. Ejemplo de escena urbana coloreada según el diferencial de temperatura entre las superficies y el aire.

3.6.2 Análisis basado en gráficos numéricos

Mediante diversas subrutinas (Anexo C), se analizarán numéricamente las matrices de temperaturas creando gráficos sobre la evolución de las temperaturas en ciertos **puntos** (1 pixel) y/o **regiones de interés de la escena** (conjunto de pixeles) a lo largo de la jornada.

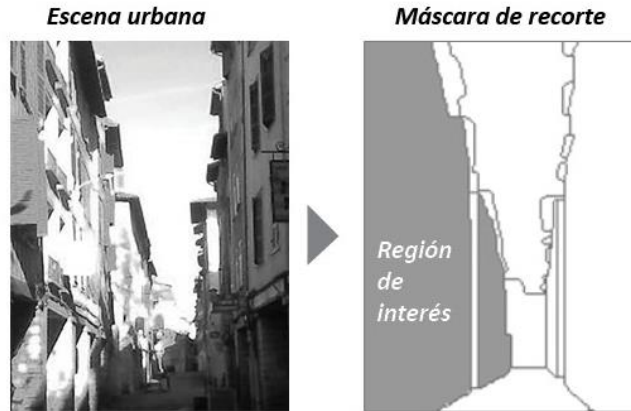
Para analizar las temperaturas de una cierta **región de la escena urbana**, se delimitarán los límites de la misma sobre una imagen del mismo tamaño que la termografía (Figura 3. 11, arriba). Esta imagen se utilizará a modo de “máscara de recorte” para extraer de la matriz 3D de temperaturas de la escena completa aquellos datos que corresponden a la región de interés, mediante la subrutina de **segmentación** descrita en el Anexo C.

Sobre la matriz 3D reducida obtenida, se llevará a cabo un análisis numérico en base a 5 valores, mediante una subrutina de análisis numérico (Anexo C):

- La temperatura superficial aparente **promedio** de la región.
- La temperatura superficial aparente **máxima y mínima** de la región.
- La temperatura superficial aparente correspondiente a los **percentiles 5 y 95**.

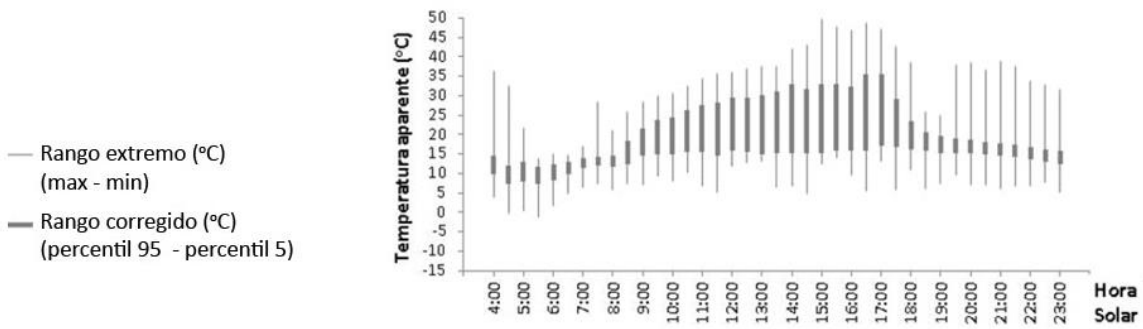
Los resultados serán exportados en formato hoja de datos (*.xlsx), **generándose gráficos** como los mostrados en la (Figura 3. 11, abajo), donde se representa el promedio, el rango “extremo” (máximo/mínimo) y el rango “corregido” (percentiles 95/5) de temperaturas de la región.

SEGMENTACIÓN DE LA IMAGEN



GENERACIÓN DE GRÁFICOS

Rangos de Temperatura: extremo y corregido



Rangos y Promedio de Temperatura con información ambiental adicional

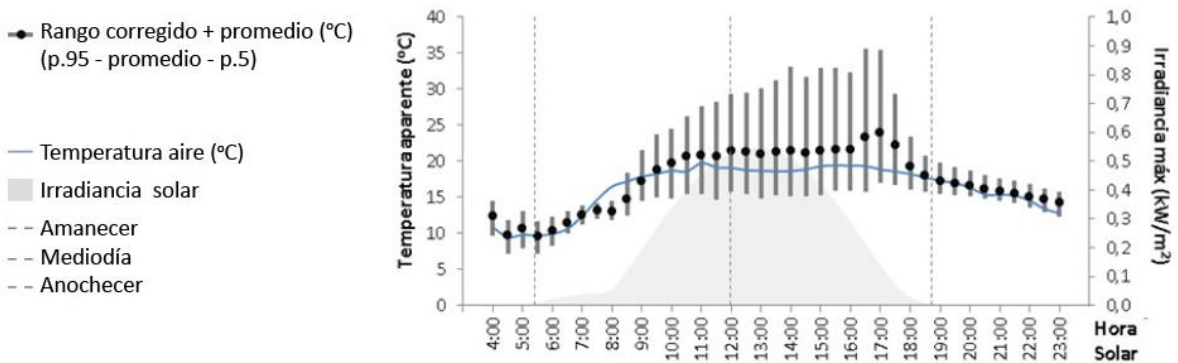


Figura 3. 11. Flujo de trabajo para el análisis de temperaturas superficiales de una región de interés.

3.7 DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

En la fase final del trabajo, se discutirá la relación entre **las temperaturas superficiales** y aspectos tales como:

- **Geometría del entorno:**
basándonos en parámetros como la orientación, los factores de vista, etc.
- **Materialidad del entorno:**
valorando especialmente la influencia de la reflectividad material, bien a nivel local o bien a escala de calle.
- **Flujos de energía sobre las superficies:**
en especial, la radiación de onda corta incidente y/o absorbida (SW) y el enfriamiento radiativo en ondas largas (LW).

La información necesaria para fundamentar esta discusión espacial y temporal de los resultados de temperatura se obtendrá a partir de diversos análisis efectuados sobre el modelo 3D generado durante la preparación de la campaña.

ANÁLISIS DE SECUENCIAS DE TERMOGRAFÍAS EN UN CAÑÓN URBANO

4.1 INTRODUCCIÓN

4.2 CASO DE ESTUDIO 1: RUE DES TONNELIERS, BAYONNE

4.3 CASO DE ESTUDIO 2: CALLE DE LAS REJAS DE DON GOME, CÓRDOBA

4.4 CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO

4.1 INTRODUCCIÓN

La morfología de la ciudad y sus características materiales condicionan de forma significativa los intercambios energéticos entre las superficies y su entorno. Como consecuencia, las temperaturas de las superficies urbanas - reflejo físico del balance energético a nivel local entre un punto y su entorno – pueden diferir notablemente entre entornos urbanos distintos desde el punto de vista climático, morfológico o material. Asimismo, incluso dentro de una escala espacial más pequeña, como sería una misma ciudad, dentro de un mismo tejido, incluso dentro de una misma fachada, las diferencias de temperatura también pueden ser relevantes, del orden de decenas de grados.

La metodología diseñada en el *Capítulo 3* se aplicará aquí a dos cañones urbanos (Figura 4.1), pertenecientes a los cascos históricos de Bayona (*epígrafe 4.2*) y Córdoba (*epígrafe 4.3*), ejemplos ilustrativos de morfologías urbanas compactas.

Las calles seleccionadas son similares desde un punto de vista geométrico, presentando una orientación y una sección transversal parecidas. Sin embargo, entre ellas existen diferencias materiales que, a priori, deberían resultar en un comportamiento térmico diferente, que debería ser evidente en las termografías.

En este capítulo, nos fijaremos principalmente en las diferencias que existen entre las fachadas urbanas de ambas calles, prestando especial atención a dos de sus características de diseño más representativas: su nivel de acristalamiento y el color de las superficies opacas. Dado que ambos aspectos condicionan el grado de **reflectividad** del entorno, comparando ambos casos de estudio, se sacarán conclusiones sobre la influencia de dicho parámetro sobre el ambiente térmico de calles con una geometría ocluida (*epígrafe 4.3*).

RUE DES TONNELIERS

$W/H = 0.42$



CALLE REJAS DE DON GOME

$W/H = 0.53$



Figura 4. 1. Planta y sección de los cañones urbanos estudiados en Bayona (arriba) y en Córdoba (abajo).

4.2 CASO DE ESTUDIO 1: RUE DES TONNELIERS, BAYONNE

4.2.1 Descripción del caso de estudio

En la ciudad de Bayona (43° 29' N) conviven morfologías urbanas muy diferenciadas (Figura 4.3). Rodeado de una gran extensión de baja densidad de edificaciones aisladas con jardín, encontramos el centro histórico, un tejido altamente compacto, considerado uno de los de mayor densidad edificada en Francia. Este entorno urbano resulta de especial interés en el ámbito de la tesis, ya que constituye un ejemplo representativo de trama compacta típico de la ciudad preindustrial. El caso de estudio que presentamos a continuación se centró concretamente en el barrio del *Petit Bayonne*, zona del casco histórico ubicada entre los ríos Nive y Adour (Figura 4.3).

[Selección del punto de medición]

La base del trabajo fue una campaña de medición de las temperaturas superficiales llevada a cabo en la *Rue des Tonneliers* (Figura 4.3). La selección de este emplazamiento y la localización del punto de medición respondió a varios motivos:

Representatividad de la escena enfocada

La *Rue des Tonneliers* posee unas características formales y materiales que pueden considerarse representativas del tejido del *Petit Bayonne*. Esta calle, como la mayoría de su entorno, tiene una sección transversal estrecha, asimétrica y de altura variable (Figura 4. 2). Además, las interrupciones en este cañón urbano están muy próximas entre sí, una configuración recurrente en las tramas preindustriales (distancia < 80m). Finalmente, la existencia de arcadas en planta baja, elemento presente inicialmente en la mayoría de las calles que desembocan en el río, enriquece las posibilidades de análisis de la sección urbana en cuanto a su relación con el peatón (Figura 4.4).

Operatividad del emplazamiento

Durante las mediciones, uno de los extremos de la calle estaba bloqueado por un andamio de obra. Al quedar interrumpida la circulación de vehículos, las mediciones se facilitaban de forma notable, un argumento clave para la selección de este emplazamiento. Otro aspecto a mencionar es que en esta época del año los edificios funcionaban en régimen libre (sólo uno usaba la calefacción). Para nuestro estudio este hecho resulta especialmente interesante, ya que, bajo estas condiciones, las temperaturas de todas las superficies estarían gobernadas únicamente por energías pasivas.

Interrelación entre los medios técnicos disponibles y las características del entorno

Para la selección de esta calle también se valoró la relación entre las dimensiones de la calle y el ángulo de apertura de la cámara (hFOV de 19°; vFOV de 25°). Desde el emplazamiento seleccionado, era posible enfocar una escena urbana en la que los edificios son observados en toda su altura, sin perder la referencia del suelo a una distancia relativamente corta.

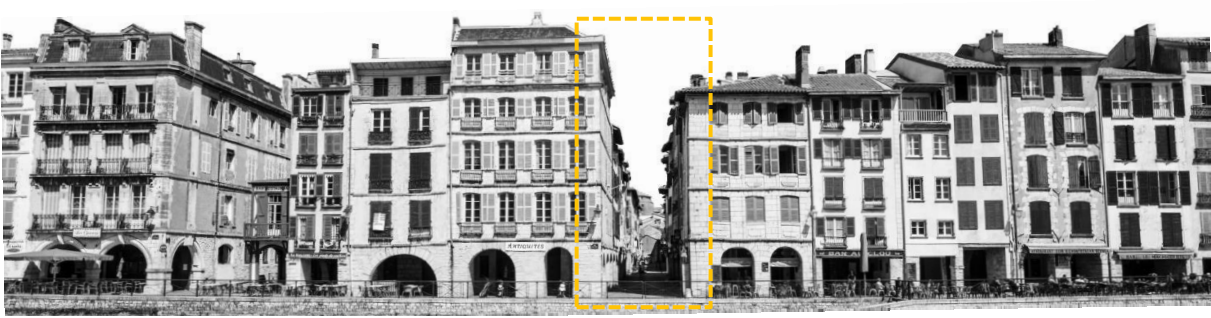


Figura 4. 2. Vista del extremo de la *Rue des Tonneliers* desde la ribera del río Nive.



Figura 4. 3. Orto-imágenes de la *Rue des Tonneliers* a diferentes escalas, en Bayona (Francia).



Figura 4. 4. Vista de la *Rue des Tonneliers* desde el eje de la calle y desde las arcadas laterales (izquierda) y de la fachada Sur en el extremo Oeste de la calle (derecha).

[Caracterización del entorno urbano seleccionado]

Características geométricas del entorno urbano

La *Rue des Tonneliers* discurre de Este a Oeste, con una ligera desviación hacia el Sur (11°). Así pues, la calle estudiada está limitada por fachadas orientadas hacia Norte y Sur y el plano correspondiente al pavimento, que consideraremos horizontal (pendiente $<1\%$).

La altura de las edificaciones de esta calle varía entre 16.75m y 11.75m, con un promedio de 14.30m. La anchura de la calle es de 6m en gran parte de su recorrido, aunque presenta dos ensanchamientos (plazas) en la intersección con la *Rue Pontrique* y la *Rue du Trinquet*, así como un estrechamiento final que desemboca en la *Rue du Jeu de Paume*. Basándonos en la anchura y altura promedio, la relación de aspecto W/H (ancho/alto) en esta calle es de 0.42 (Figura 4.5). Este valor proporciona una primera idea de la notable oclusión del entorno. Sin embargo, las irregularidades del emplazamiento en planta y sección lo alejan del concepto ideal de cañón simétrico e infinito, invitando a trabajar desde un enfoque más relacionado con la morfología real.

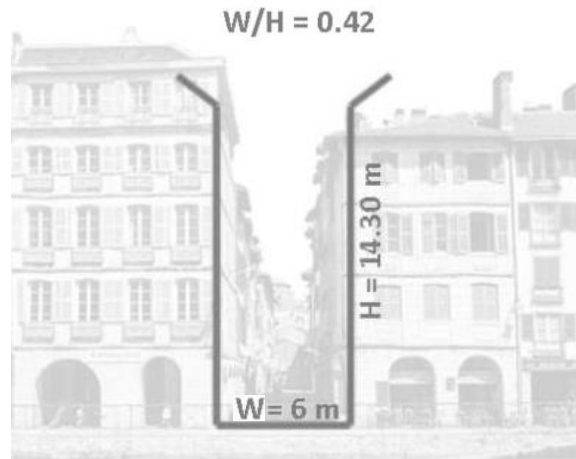


Figura 4. 5. Sección transversal promedio de la *Rue des Tonneliers*

En esta línea se realizó un levantamiento 3D de la *Rue des Tonneliers* y su entorno urbano más próximo, con un nivel de detalle LOD 3.1 (Biljecki et al. 2016). La información utilizada para crear dicho modelo provino de tres fuentes. En primer lugar, los datos catastrales disponibles (parcelario 2D). En segundo lugar, se realizaron mediciones *in-situ* de distintos elementos en fachada: altura de cornisa, profundidad de voladizos, tamaño y distribución de huecos. Finalmente, la volumetría del modelo se completó en *Google Earth Pro*, tanto en 2D (orto-imagen) como 3D (opción de relieve y edificios 3D). Estos datos fueron empleados para modelar aquellos elementos arquitectónicos no visibles desde el nivel de calle, como por ejemplo: la configuración de patios, la forma, altura y pendiente de las cubiertas, la posición y tamaño de lucernarios y/o huecos retranqueados, etc. El resultado fue un modelo CAD interactivo de la Figura 4.6.

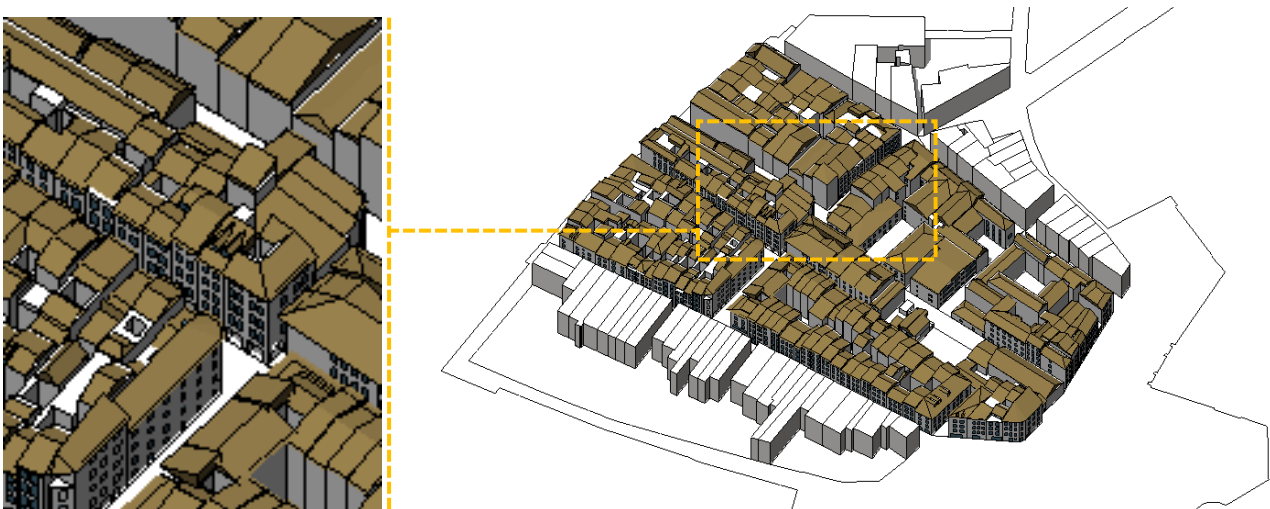


Figura 4. 6. Modelo CAD interactivo del *Petit Bayonne* en su zona más próxima a la *Rue des Tonneliers*, realizado por la doctoranda en colaboración con los alumnos de "Física Urbana" de la ISA-BTP de Anglet (2017).

Este modelo 3D fue utilizado para caracterizar geoméricamente el entorno urbano del caso de estudio. El análisis se basó en un indicador estrictamente geométrico, pero con un papel clave en la física de los intercambios radiativos de tipo difuso: el factor de forma (o de vista) entre superficies.

Concretamente, se calcularon los factores de vista fachada-fachada (*Building View Factor, BVF*), fachada-suelo (*Ground View Factor, GVF*) y fachada-cielo (*Sky View Factor, SVF*), empleando el software HELIODON 2 (Beckers & Masset 2006). En la Figura 4.8 se representan estos descriptores geométricos sobre las fachadas del modelo urbano.

Las imágenes demuestran que, en la mayor parte de las superficies de fachada de este entorno urbano, el factor de vista predominante es el *Building View factor*. Este hecho recalca el papel clave de estos paramentos en los intercambios radiativos en entornos compactos.

Estos “mapas de inter-visibilidad” entre las superficies del entorno permiten identificar la presencia de discontinuidades en el cañón. A partir de los cambios en los factores de vista, podemos, por ejemplo, reconocer la aparición de plazas en la intersección con la *Rue Pontrique* y con la *Rue du Trinquet*.

Basándonos en este enfoque, se ha reflexionado sobre el grado de irregularidad del entorno de estudio. Para ello se han comparado los resultados del modelo de la *Rue des Tonneliers* con los que se obtendrían en un cañón urbano ideal infinito (Figura 4.7). Las diferencias entre ambos evidencian el notable impacto de las irregularidades - tanto horizontales como verticales - sobre la distribución de los factores de vista. Esta imagen también permite valorar el efecto de los voladizos como elemento que obstruye la visión del cielo a nivel local. Este hecho será importante, a la hora de reflexionar sobre el nivel de detalle recomendable para llevar a cabo estudios radiativos a escala urbana.

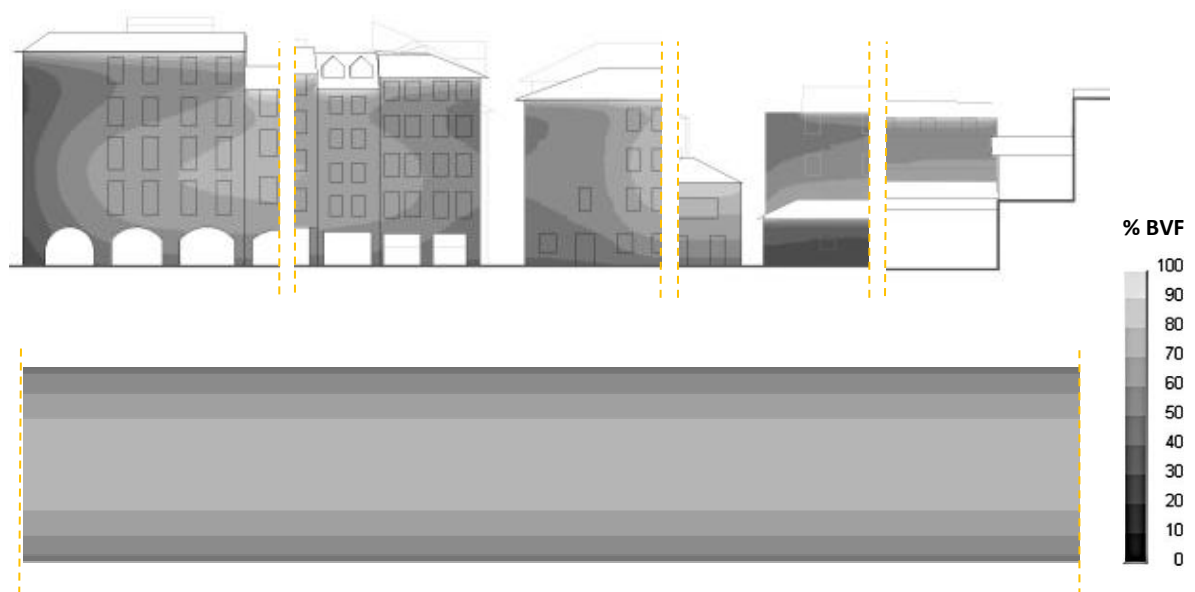


Figura 4. 7. Comparación del BVF de la fachada Sur de la *Rue des Tonneliers* con la del cañón urbano infinito con las proporciones de la Figura 4.5.

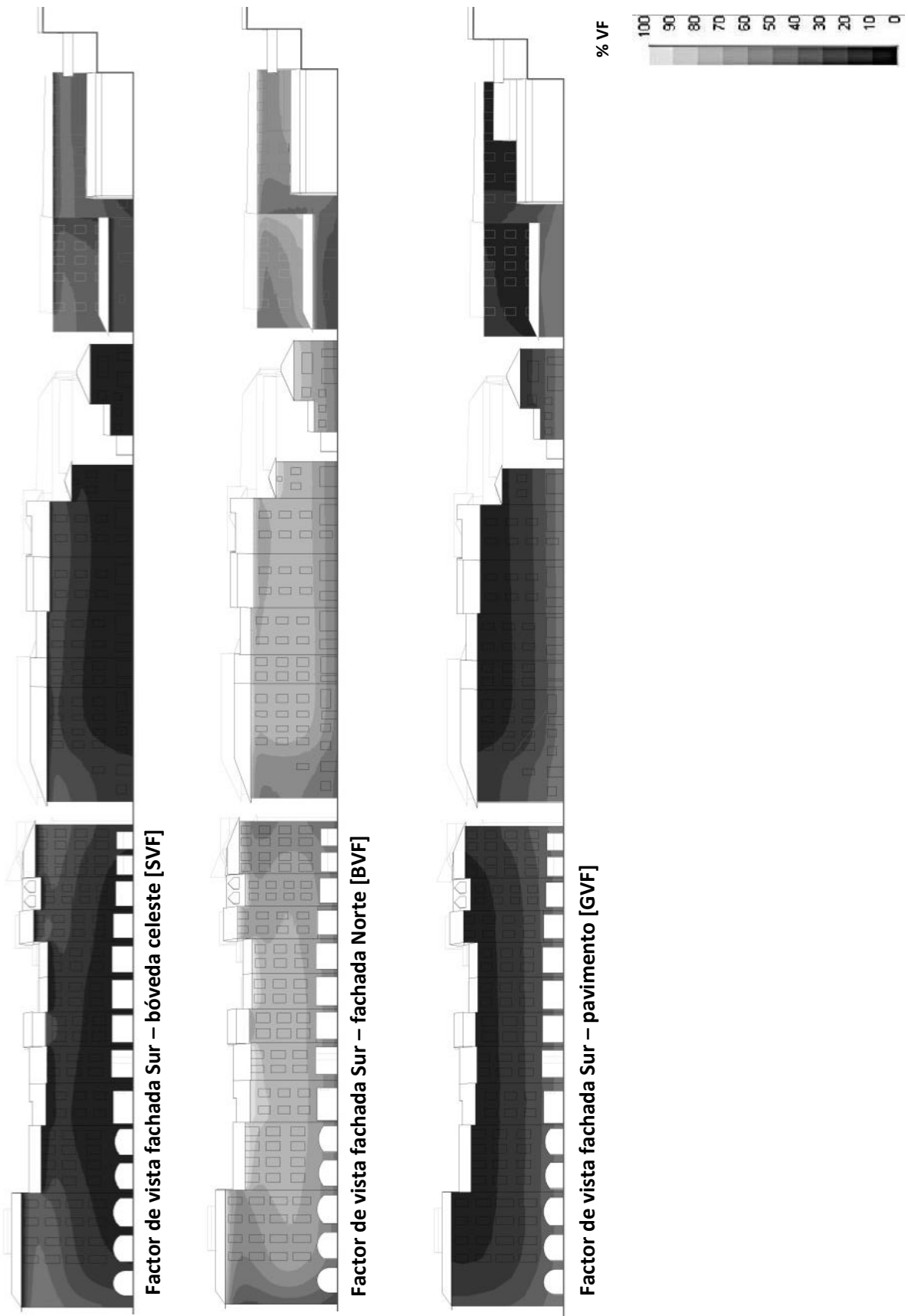


Figura 4. 8. Factores de vista entre la fachada Sur y el resto de superficies del cañón: cielo, fachada Norte y Pavimento.

Características materiales del entorno urbano

Sistema constructivo

El sistema constructivo mayoritario de los edificios de la *Rue des Tonneliers* es el *pan de bois*. Este sistema constructivo consiste en un entramado de travesaños y montantes de madera con relleno de ladrillo o *torchis* recubierto de mortero. Para protegerla de la humedad, la estructura de madera reposa sobre un basamento de piedra. En nuestro caso, éste es de granito y coincide con la planta baja. Esta mixticidad material del sistema constructivo (mortero, madera y piedra) es visible desde el exterior en numerosos casos. Mientras que en otras ocasiones, la fachada ha sido completamente recubierta con mortero por su menor coste de mantenimiento (Figura 4.9).



Figura 4. 9. Ilustración de la fachada Sur de la *Rue des Tonneliers* (Duplantier & Contamin 2012).

Reflectividad de los materiales

Los coeficientes de reflectividad de los materiales más abundantes en las fachadas del caso de estudio (mortero, piedra, madera, vidrio y asfalto) se muestran en la Figura 4.10. Dichos valores fueron determinados experimentalmente en una campaña de medición, exceptuando los referidos al vidrio, donde se tomaron valores de referencia de vidrios simples de diversas casas comerciales recogidos en (Boada i Xairó 2013). La variedad de colores y materiales de la fachada se traduce en una notable variabilidad en coeficientes de reflexión, que oscilan entre el 11% y el 71%, correspondientes al vidrio y al mortero blanco, respectivamente.

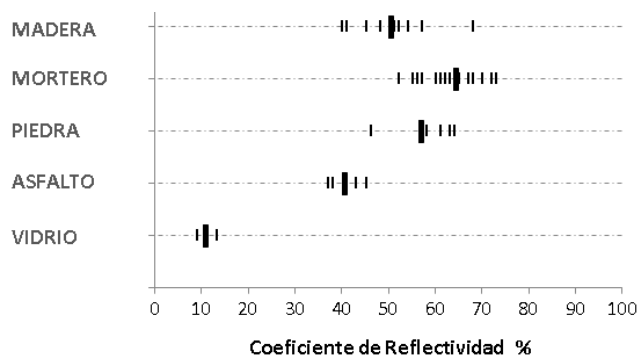


Figura 4. 10. Valores individuales y promedio de los coef. de reflectividad de los materiales de la *Rue des Tonneliers*.

Asignando los anteriores coeficientes de reflexión al modelo 3D, se cuantificó la reflectividad del cañón y su nivel de acristalamiento (Figura 4.11). Ponderando superficialmente los coeficientes individuales, es posible obtener un valor de reflectividad global que puede ser útil en la evaluación térmica del cañón urbano en su conjunto. De este análisis se pudo concluir, por un lado, que la gran heterogeneidad en las reflectividades individuales de los materiales del cañón resulta en una reflectividad global del 50%. Y, por otro, que los huecos en fachadas en este cañón urbano representan un cuarto de la superficie de la misma. En estudios complementarios realizados por la doctoranda, se subrayó la importancia de la tasa de acristalamiento, parámetro sobre el que se dispone poca información (Garcia-Nevado, Beckers & Coch 2017) y con una notable influencia sobre la demanda de climatización en un contexto urbano (Garcia-Nevado, Beckers, Coch, et al. 2017).



Figura 4. 11. Alzados y planta con los coeficientes de reflexión asignados al modelo 3D de la Rue des Tonneliers.

4.2.2 Toma de datos experimentales

La campaña de mediciones se llevó a cabo entre las 4:00 ST y las 23:00 ST del 23 de abril de 2017 (respectivamente, las 6:07 OT y las 01:07 OT). Cada 30 minutos, se tomaron **fotografías en luz visible e infrarrojo**, obteniéndose un total de 39 pares de imágenes. Con objeto de calibrar las termografías, se registraron las **condiciones ambientales de la medición**: temperatura del aire, humedad relativa, velocidad del viento (in-situ), radiación solar global horizontal (estación meteorológica).

Los equipos de medición utilizados en la campaña de medición fueron: una cámara termográfica FLIR B200 (A), un termo-anemómetro SDL350 (B) y un termohigrómetro HOBO U12 (C), con las características que se describen en el Anexo C. Estos aparatos fueron fijados a un trípode según la disposición que se observa en la Figura 4.12. La cámara se colocó a una altura de 1.5m sobre el suelo, centrada en el eje de la calle, con la apertura de 19° en horizontal y de 25° en vertical, con una inclinación de 10° con respecto al plano del suelo. La ubicación de los equipos, en especial de la cámara, tiene gran importancia sobre el tipo de resultados que pueden obtenerse. En nuestro caso, este aspecto fue objeto de diversos ensayos previos. La posición final se decidió porque posibilitaba la observación simultánea de ambas fachadas, el pavimento y una fracción del cielo.

La estación meteorológica de referencia para este estudio se encuentra sobre una cubierta sin obstrucciones, del edificio de la empresa Nobatek, a 3.4 km del sitio de medición (Figura 4.12). Dado que la campaña experimental se desarrolló en un día completamente despejado, la radiación en la estación meteorológica y en el entorno de medición pueden considerarse equivalentes.

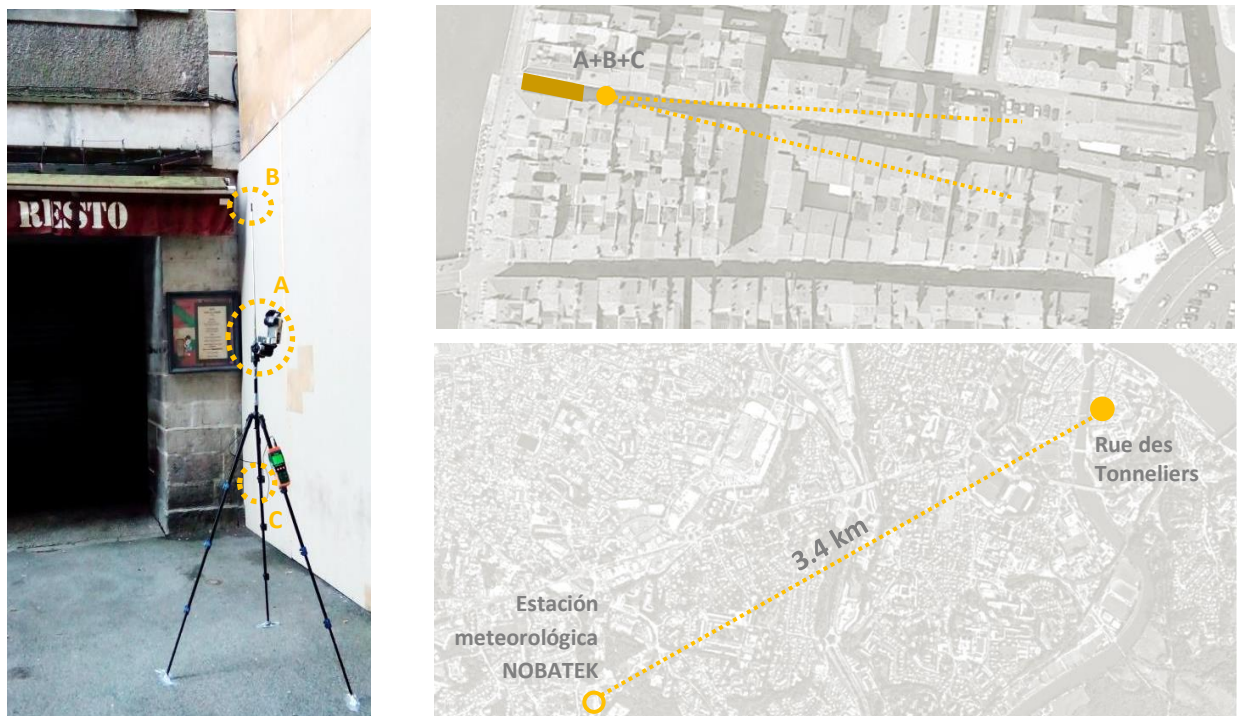


Figura 4. 12. Disposición de los equipos de medición en Rue des Tonneliers y distancia a la estación meteorológica.

[Condiciones meteorológicas del día de medición]

Temperatura y humedad del aire

El día 23 de abril de 2017 fue una jornada con temperaturas suaves y con baja humedad (para los valores habituales de Bayona, ciudad con un clima lluvioso). La Figura 4.13 recoge la temperatura y la humedad relativa del aire a lo largo de la campaña de medición. Durante estas horas, la temperatura del aire osciló entre 8.5°C registrados a las 4:30h y 19.4°C de las 16:00h, con un promedio de 16.3°C. Por su parte, la humedad relativa varió entre 71 y 53%, registrados en los momentos del día con mayor y menor temperatura del aire, respectivamente. La humedad relativa promedio fue el 61%.

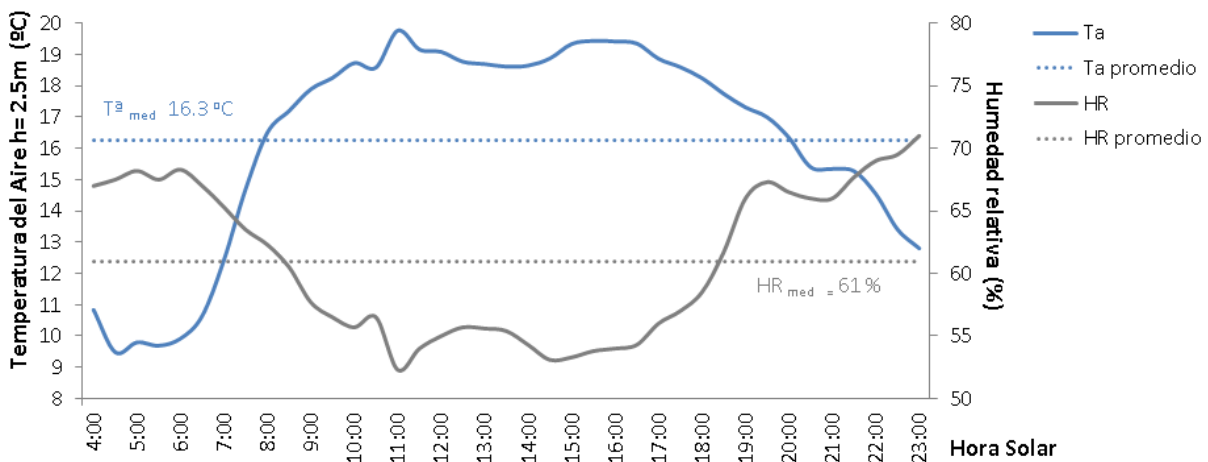


Figura 4. 13. Temperatura del aire y humedad relativa durante la medición en la Rue des Tonneliers (23/04/2017).

Velocidad del viento

La velocidad del viento durante la campaña de medición fue débil, con un promedio de 0.2 m/s. La Figura 4.14 recoge la velocidad del viento registrada en el interior del cañón urbano a 2.5m de altura, tanto de forma instantánea como en promedio cada media hora. Observamos que en ningún caso se supera el valor de 1 m/s considerado como límite para la validez de la termografía.

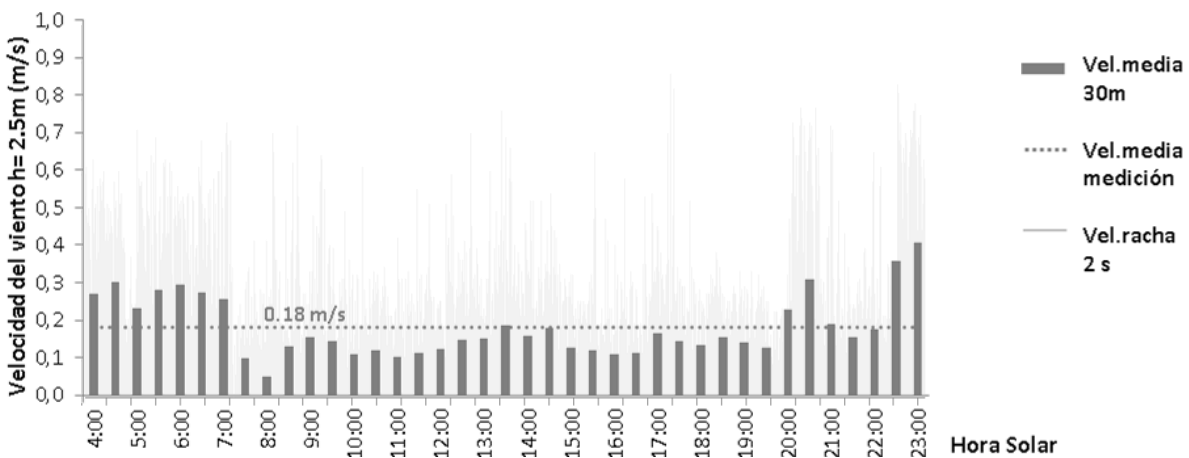


Figura 4. 14. Velocidad del viento (m/s) durante la medición en la Rue des Tonneliers (23/04/2017).

Radiación solar

La campaña de medición se desarrolló durante un día soleado. En la Figura 4.15, se presenta la radiación global sobre plano horizontal, medida en la estación meteorológica. Los datos reflejan la total ausencia de nubes durante la jornada de medición.

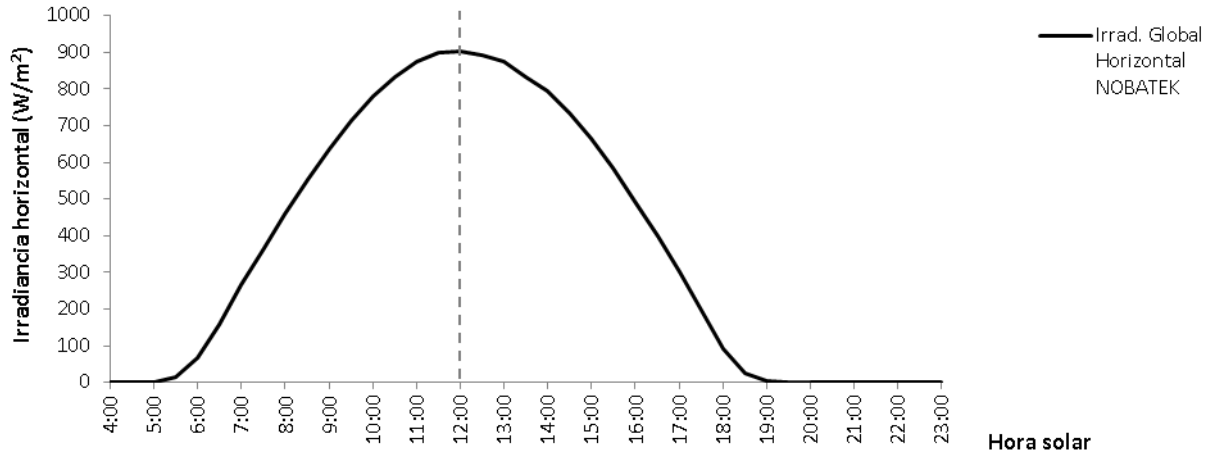


Figura 4. 15. Irradiancia horizontal (W/m^2) medida en la estación Meteorológica de Nobatek (23/04/2017).

En la Figura 4.16, se contraponen la radiación global horizontal medida con la calculada según el modelo de cielo despejado de Liu & Jordan (1960) para el mismo día, una vez ajustada la transmisividad de la atmósfera a $\tau = 0.73$. Observamos que entre ambos valores existe una gran correspondencia, con una desviación sobre la energía total diaria acumulada inferior al 2%. Para el mismo valor de τ , se calculó la irradiación global sobre un plano vertical sin obstrucción con la misma orientación que las fachadas de la *Rue des Tonneliers*: Norte, Sur y Oeste, giradas 11° (Figura 4.17). Sobre estos planos, el flujo solar alcanza una intensidad máxima de 120, 550 y $620 \text{ W}/\text{m}^2$, respectivamente.

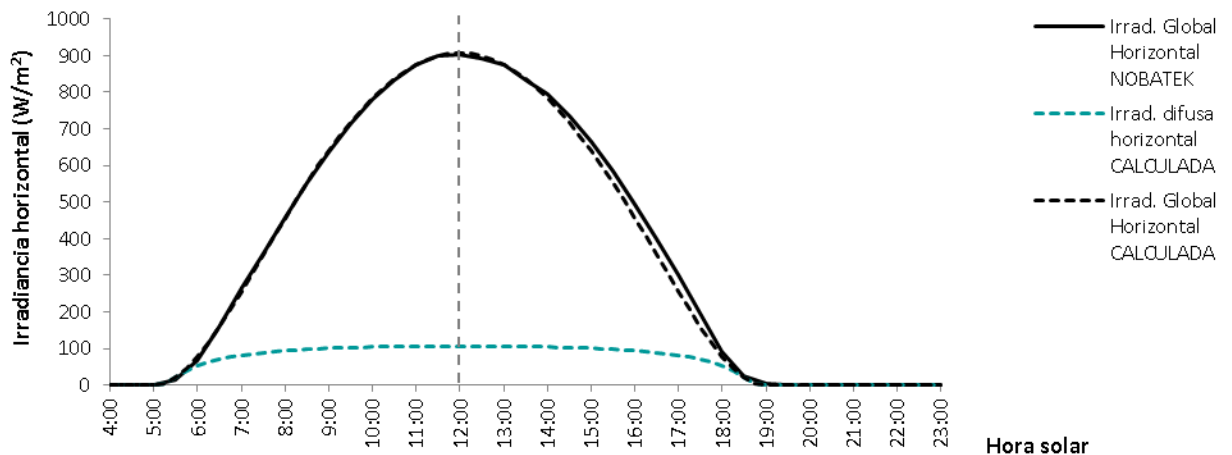


Figura 4. 16. Irradiancia horizontal (W/m^2) medida (23/04/2017) y calculada según el modelo de Liu Jordan para cielo despejado (23/04 en Bayona).

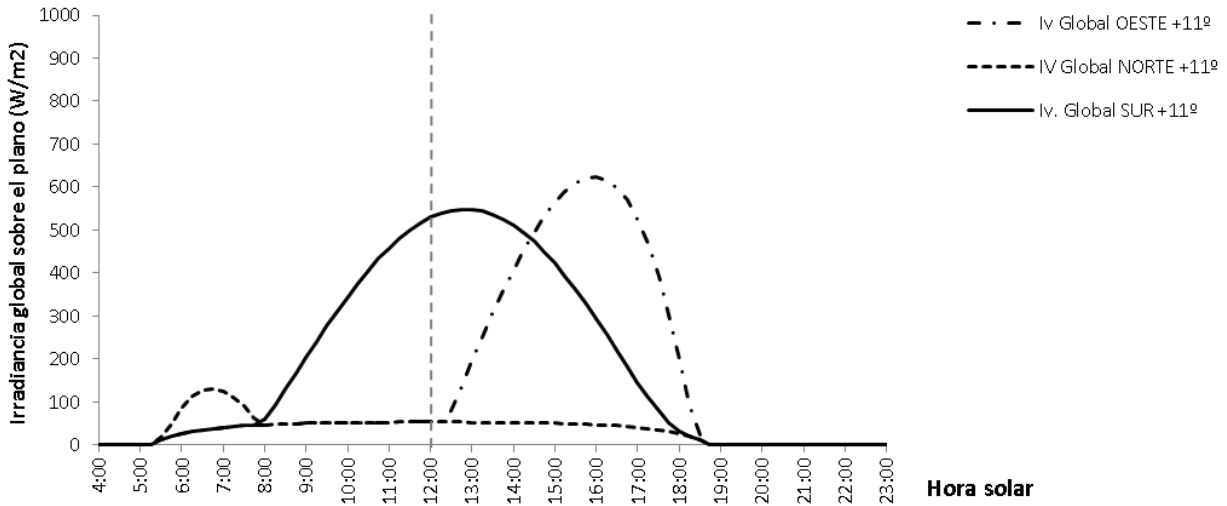


Figura 4. 17. Irradiancia sobre plano vertical a Sur, Norte y Oeste (W/m^2) calculada según el modelo de Liu Jordan para cielo despejado (23/04 en Bayona).

En ausencia de obstrucciones, el plano que recibe mayor radiación solar acumulada a lo largo del día es el horizontal, seguido del orientado a Sur, a Oeste y, finalmente, a Norte (Figura 4.18). En el plano horizontal y las fachadas Sur y Oeste, más de tres cuartos de la energía recibida por el plano proviene de la componente solar directa. En cambio, en un plano orientado Norte, la componente directa sólo supone un 20%. Las máximas irradiancias sobre fachada se alcanzan en la orientada a Oeste (ya que el sol incide más perpendicular a la superficie), seguidos de la Sur.

La *Rue des Tonneliers* es un entorno urbano notablemente ocluido, con una reflectividad media-baja. Por ello, la radiación global recibida por las superficies proviene mayoritariamente de las componentes directa y difusa, mientras que el peso de la radiación reflejada debe ser, *a priori*, limitado. Esta componente puede ser de especial relevancia en el caso de la fachada Norte, por el hecho de estar enfrentada al plano Sur, más altamente iluminado.

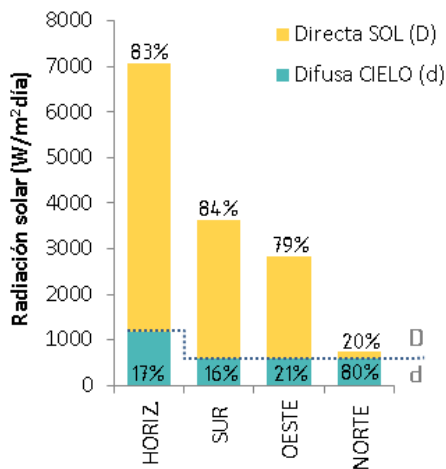


Figura 4. 18. Radiación solar acumulada (W/m^2 día) calculada para el 23 de abril sobre planos horizontal y vertical sin obstrucción (Sur/Oeste/Norte) diferenciando el % de contribución directa (D) de difusa (d).

4.2.3 Procesamiento de los resultados

La metodología general de tratamiento de imágenes termográficas se detalla en el *Capítulo 3*, por lo que en esta sección nos limitaremos a realizar algunos comentarios sobre su aplicación particular al presente caso de estudio.

El procesamiento de las termografías comenzó por la **importación de las 39 termografías originales** en la herramienta *FLIR Tools*. A continuación, se calibraron los parámetros de dichas imágenes según las condiciones de medición existentes durante la toma, ajustando sus valores como se indicaba en la Tabla 4.1.

PARÁMETRO	VALOR
Emisividad	1.00
Distancia	0 m
Temperatura atmosférica	<i>Figura 4.13</i>
Humedad relativa	<i>Figura 4.13</i>
Temperatura Reflejada	<i>Indiferente</i>

Tabla 4. 1. Parámetros utilizados para la calibración de termografías en el Caso de Estudio de la *Rue des Tonneliers*.

Posteriormente, se exportaron las matrices de temperaturas asociadas a las imágenes calibradas en formato *.csv. Dicha información matricial fue tratada en MATLAB, con un doble propósito:

- **Generación de imágenes:**

Las matrices de temperaturas fueron coloreadas según tres criterios, generando tres tipos de imágenes:

- Secuencia temporal de termografías: Tras un análisis global de las temperaturas de la muestra, se creó una secuencia de termografías con una escala de color unitaria entre 10 y 36°C, donde se incluían el 90% de las superficies construidas (no así el cielo).
- Imágenes coloreadas individualmente: termografías con un rango de temperaturas más reducido, adaptado a los valores específicos de la toma o del fenómeno.
- Secuencia del diferencial de temperatura superficie-aire: *time-lapse* del diferencial (positivo o negativo) entre la temperatura aparente superficial y la del aire.

- **Generación de gráficos sintéticos**

La escena urbana estudiada se caracteriza por una gran heterogeneidad, sobre todo en fachada. Por ello, para evaluar la evaluación térmica del cañón, se optó por el análisis en base a regiones de interés, asociadas a los grandes planos que conforman la escena. En esta línea, se identificaron 6 regiones de estudio: fachada Sur, fachada Norte, fachada Oeste, pavimento, cubiertas y cielo (Figura 4.19).

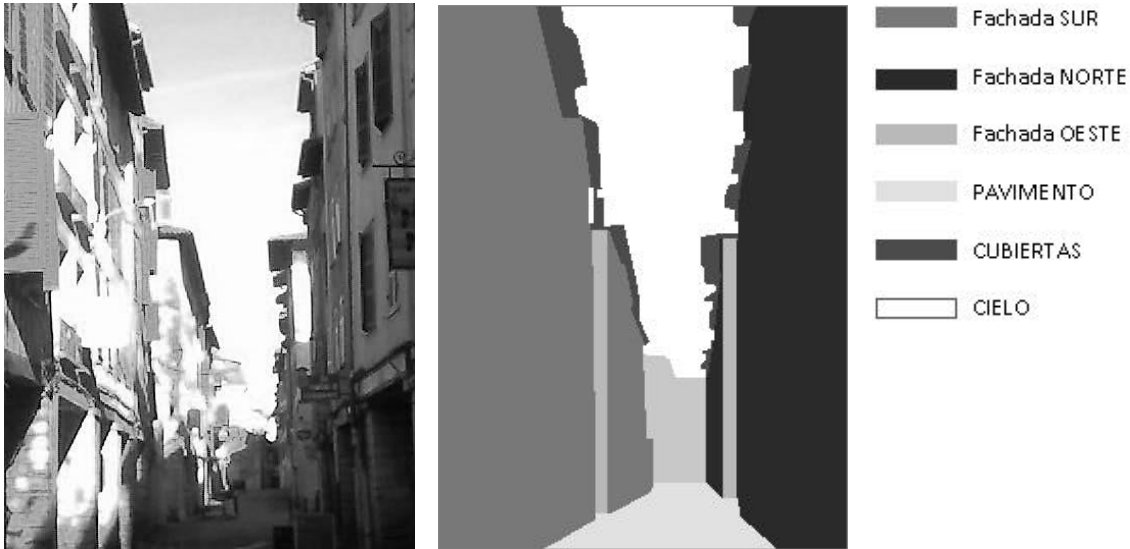


Figura 4.19. Segmentación de las regiones de interés de la escena urbana estudiada en la *Rue des Tonneliers*.

4.2.4 Análisis y discusión de resultados

[Análisis basado en imágenes]

Tras procesar los datos de las mediciones, se obtuvo un *time-lapse* compuesto por 39 fotografías y 39 termografías (Anexo A). De dicha secuencia, se han extraído cuatro momentos representativos de la evolución de las temperaturas superficiales a lo largo de la jornada. (Figura 4.20)

Antes del amanecer fue el momento del día en que las superficies estuvieron más frías (entre 6°C y 15°C) y donde la distribución de temperaturas fue más homogénea. Con la salida del sol y su incidencia sobre las superficies, los elementos orientados al Este comenzaron a calentarse (ej. carteles), aumentando con ello la heterogeneidad de temperaturas. A las 8:30h, el sol penetraba hasta la base del cañón urbano, iluminando toda la fachada Sur de forma rasante y parte del pavimento de la calle.

En las siguientes horas, el sol va ganando altura hasta el mediodía en su camino hacia el Sur. A las 14:00h, la radiación solar incidía de forma directa en la parte superior de las fachadas a Sur y Oeste. En estas zonas se alcanzaron las temperaturas aparentes más elevadas de la jornada, de hasta 36°C, que contrastaban con los apenas 14°C de las partes altas de la fachada Norte.

Finalmente, durante la noche, las diferencias de temperatura entre superficies volvieron a reducirse, igualándose gradualmente a las del aire. Se observa, no obstante, que las temperaturas de las superficies más soleadas – orientadas a Sur y a Oeste – permanecieron ligeramente más altas que el resto, a consecuencia de la inercia térmica. A partir de la secuencia de las imágenes, podemos diferenciar dos comportamientos térmicos a lo largo de la jornada, en función del fenómeno radiativo que gobierna.

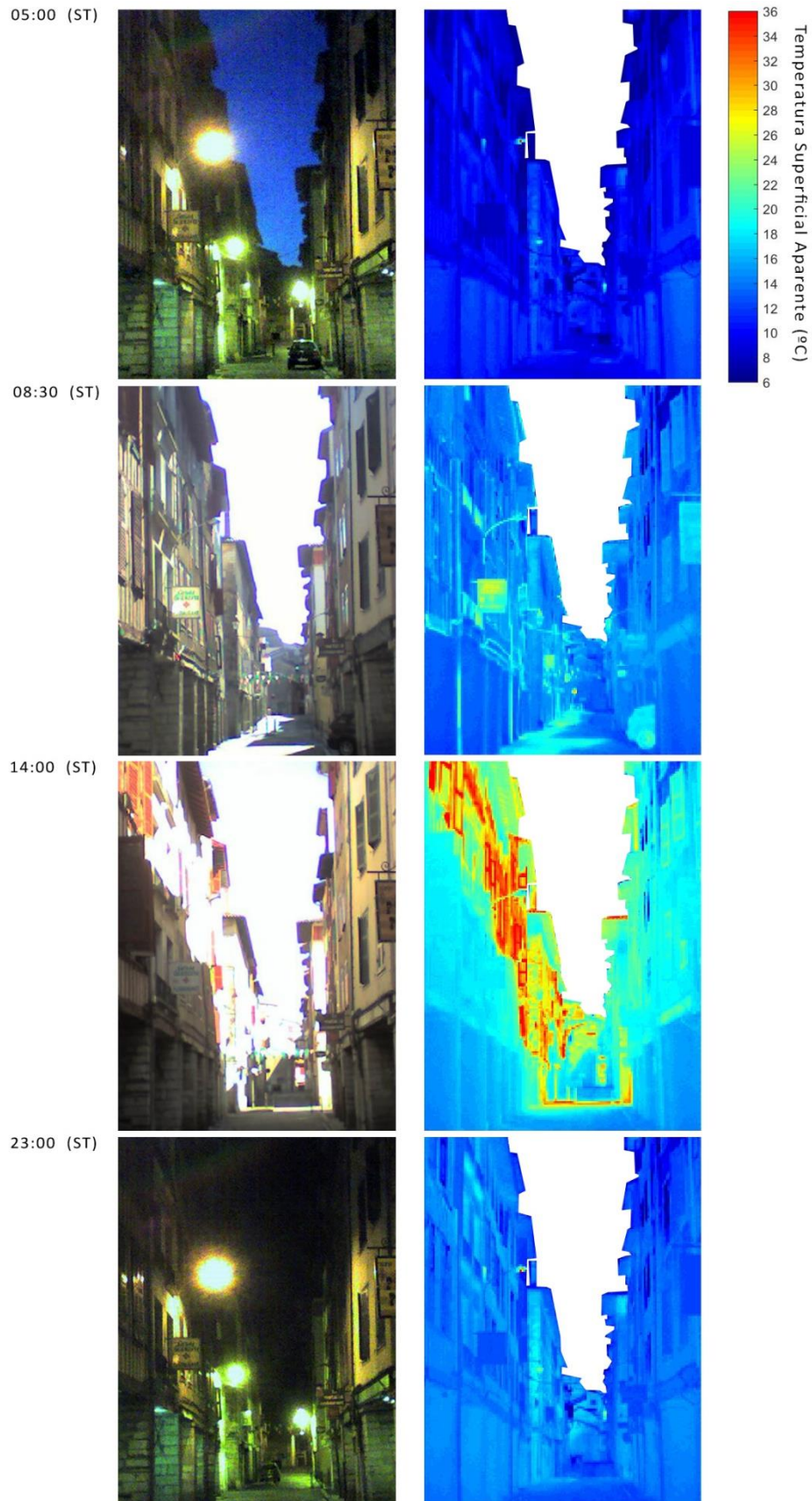


Figura 4. 20. Extracto de la secuencia de imágenes visibles y termográficas de la campaña de mediciones de la Rue des Tonneliers (23/04/2017).

El primero de los comportamientos tiene lugar en **presencia de radiación solar**. Para ilustrarlo, tomaremos el ejemplo de la Figura 4.21, donde a la izquierda se representa la radiación solar directa acumulada desde el amanecer hasta las 14:00h, momento en que se toma la termografía de la derecha. La notable similitud entre las dos distribuciones indica que la **radiación solar y la inercia de los objetos soleados rigen las temperaturas superficiales cuando el sol está presente**.

Un aspecto que se desprende de estas imágenes es la estrecha relación que existe entre las **obstrucciones solares particulares de un punto y la temperatura superficial** que éste presenta. Cuando la radiación solar directa incide sobre las superficies, aparece una “mancha solar” que es reconocible también en las termografías infrarrojas. Por ejemplo, la sombra creada por el voladizo de las cubiertas explica que la parte superior de las fachadas permanezca notablemente más fría que el resto. Si observamos la secuencia completa, veremos que la incidencia de la radiación solar se traduce en un aumento relativamente rápido de las temperaturas superficiales, con una magnitud variable según la reflectividad del material. Sin embargo, cuando la radiación deja de incidir, las temperaturas descienden más despacio por efecto de la inercia.

La observación de estas imágenes también permite deducir que **la conducción lateral en las superficies es débil**. En las superficies formadas por un único material (ej. pavimento), este efecto se percibe en el hecho de que los límites de la zona iluminada y de la caliente coinciden. Asimismo, también podemos observarlo en superficies heterogéneas (ej. *pan de bois*), donde la distribución de temperaturas aparentes responde de manera casi exacta al “mosaico” de coeficientes de reflexión de la superficie. De hecho, en la termografía es posible distinguir las partes más claras (más frías) de las más oscuras (más calientes) dentro de una misma superficie iluminada.

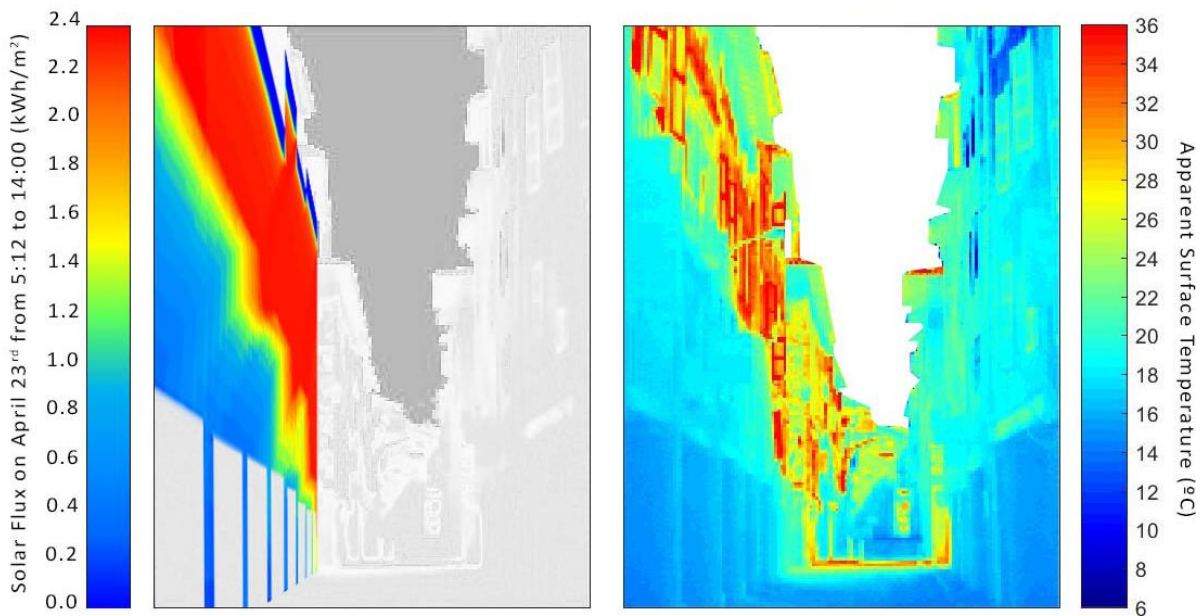


Figura 4. 21. Radiación acumulada desde la salida del sol hasta las 14:00h ST (calculada con HELIODON 2 (Beckers & Masset 2006) y Temperatura superficial aparente medida sobre la termografía a las 14:00h (23/04/2017)

El segundo de los comportamientos térmicos que podemos identificar en la jornada se produce en **ausencia de radiación solar**. Bajo estas circunstancias, las temperaturas de la escena están gobernadas por **el enfriamiento radiativo hacia el cielo**.

Para explicar el origen de este fenómeno, nos basaremos en una termografía tomada justo antes del amanecer (Figura 4.22). En ella observamos que las temperaturas de las superficies construidas están próximas entre sí (la diferencia es de $\approx 10^\circ\text{C}$). En cambio, la diferencia térmica entre el cielo despejado (muy frío, sobre todo cuanto más próximo al cenit) y las superficies es mucho mayor (hasta de 43°C). Dado que el flujo radiativo neto entre dos superficies depende de la diferencia entre sus temperaturas elevadas a la cuarta potencia, las pérdidas de energía hacia el cielo pueden exceder fácilmente las posibles ganancias provenientes del resto de superficies construidas. En consecuencia, cuanto más cielo “vea” una superficie (es decir, mayor factor de vista de cielo), más se enfría. Este efecto explica el hecho de que las zonas más frías de la escena se sitúen en la parte superior de las fachadas¹.



Figura 4. 22. Temperatura aparente de las superficies y del cielo a las 04:30 ST (23/04/2017), representada mediante una doble escala de color.

Para cuantificar la correlación entre la temperatura superficial y la visión del cielo, se ha seleccionado una escena donde este efecto es particularmente obvio (Figura 4.23). Esta termografía fue tomada el 8 de mayo a las 4:00h, bajo condiciones ambientales similares a las del presente caso de estudio. Para cuatro puntos indicados, se calculó el *Sky View Factor* (SVF) en HELIODON 2 y se extrajo de la termografía su temperatura superficial aparente.

¹ La diferencia de temperatura en la parte superior e inferior de la fachada puede relacionarse, al menos parcialmente, con fenómenos de tipo convectivo. Dentro del cañón urbano se produce un aumento de la velocidad del viento con la altura, y con él, de las pérdidas por convección. La magnitud de dicho incremento depende de la morfología del cañón. En cañones profundos, los cambios en la velocidad del viento son limitados, por lo que en nuestro caso de estudio este aspecto no será tenido en cuenta. (Georgakis et al. 2010).

La correlación de ambos datos evidencia la relación inversa que existe entre SVF y la temperatura superficial, que puede aproximarse mediante una función no lineal (Figura 4.24). La variación de SVF genera diferencias de temperatura aparente de hasta 4°C dentro de una misma fachada.

En esta termografía, el uso de una barra de color más estrecha revela ciertos detalles adicionales. Las estructuras de madera se enfrían más rápido durante la noche por su menor inercia térmica. Las ventanas más calientes de la escena (abajo izquierda) parecen indicar que la estancia anexa está calefactada. La fachada de la derecha está más caliente que el resto, ya que absorbió más radiación el día anterior.

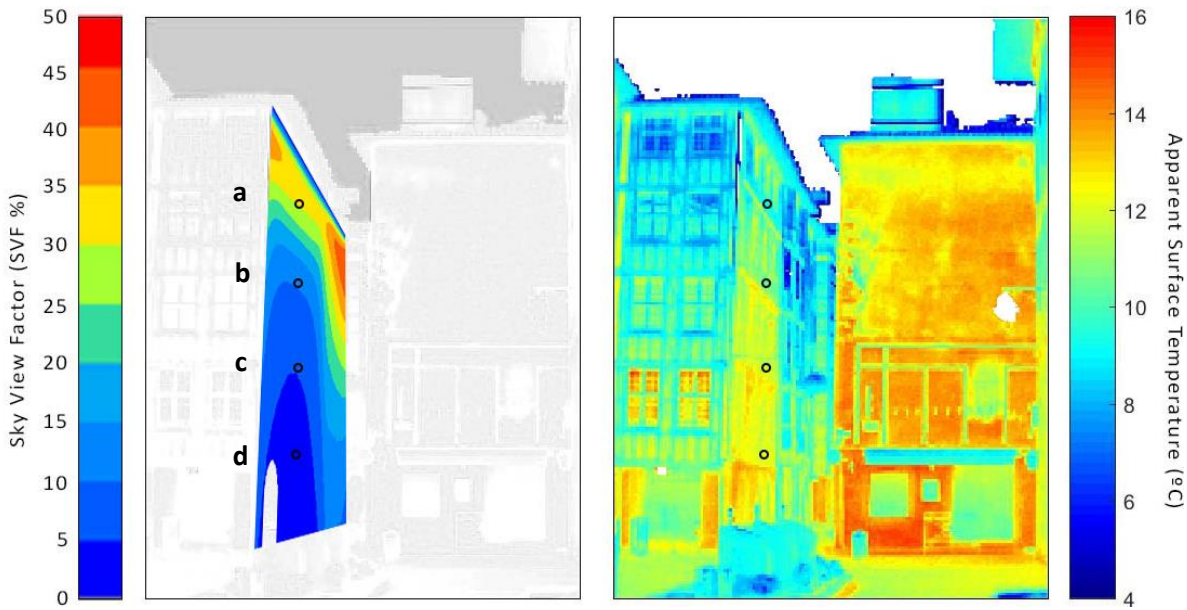


Figura 4. 23. Distribución de SVF en fachada y termografía desde la Rue Pontrique a las 04:00 ST (08/05/2017).

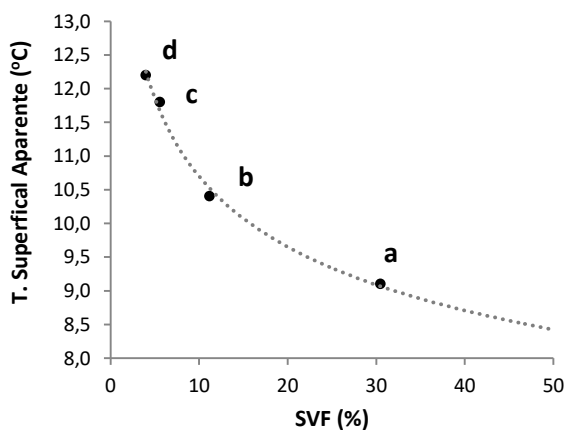


Figura 4. 24. Relación entre temperatura superficial aparente y SVF en cuatro puntos de fachada de la Rue Pontrique, a las 04:00 ST (08/05/2017).

Relación entre la temperatura del aire y de las superficies

En la Figura 4.25, se muestra la diferencia entre la temperatura superficial aparente y la del aire en el momento en que la imagen fue tomada², para cuatro momentos representativos de la jornada. En las imágenes, se diferencian las superficies que están más calientes que el aire (tonos rojizos) de las que están más frías (tonos azulados). Además, se proporciona información sobre magnitud del desfase de temperaturas aire-superficie (intensidad del degradado).

Antes del amanecer, la temperatura de la mayoría de las superficies fue similar a la del aire. Las diferencias más notables se localizaron en las cubiertas y las partes altas de las fachadas, con un mayor factor de vista de cielo. **A primera hora de la mañana**, casi la todas las superficies de la escena estaban más frías que el aire, ya que éste, con menor capacidad térmica, se calienta más rápido que las superficies. La excepción la encontramos en los elementos que ya recibían radiación solar directa, como los orientados a Este (carteles) y una pequeña porción del pavimento. **Durante las horas centrales del día**, se distinguen dos comportamientos. Por un lado, las partes de la escena que recibían radiación solar directa estaban notablemente más calientes que el aire (+23°C en la fachada Sur, +18°C en la Oeste, +14°C en el pavimento). Por otro, las superficies en sombra se mantuvieron, en su mayoría, ligeramente más frías que el aire, exceptuando ciertas superficies oscuras que elevaron su temperatura a causa de la absorción de la radiación reflejada del entorno (ej. algunos edificios y contraventanas de la fachada Norte). **Desde la puesta de sol y durante las primeras horas de la noche**, las superficies se mantuvieron más calientes que el aire, salvo las partes altas de la fachada Norte y las más sombrías del pavimento. Esta situación es explicable nuevamente por los efectos combinados de la inercia y la radiación solar. Así pues, la temperatura del aire (baja capacidad térmica) desciende rápidamente al caer la noche, mientras que la de las superficies construidas (capacidad térmica mayor) cambia de forma más lenta. A lo largo de la noche, las temperaturas superficiales tienden a aproximarse a las del aire, hasta llegar a una situación similar a la representada en la Figura 4.22.

La representación gráfica del diferencial de temperatura aire-superficie puede ayudar a interpretar cómo las superficies urbanas intercambian energía por convección. Así, las áreas de nuestra escena rojizas estarían perdiendo energía por convección, mientras que las azules la estarían ganando. Los resultados aquí presentados, no obstante, deben interpretarse como orientativos por dos motivos. En primer lugar, por las diferencias entre la temperatura aparente de las superficies y la real, a causa de los efectos angulares de la emisividad (se cuantificó que, por este efecto, las superficies aparentan estar $\approx 2^\circ\text{C}$ de su temperatura real).

En segundo lugar, por los cambios de la temperatura del aire dentro del cañón en función de la altura. Aun así, esta aproximación resulta interesante para mostrar la variabilidad de los intercambios por convección que pueden darse dentro de una misma fachada, pudiendo estar ganando o perdiendo energía en un mismo momento según el punto de análisis. Este hecho recalca la importancia de abordar los fenómenos energéticos en ambiente urbano simultáneamente desde una perspectiva cualitativa (distribución espacial) y cuantitativa (magnitud de las diferencias).

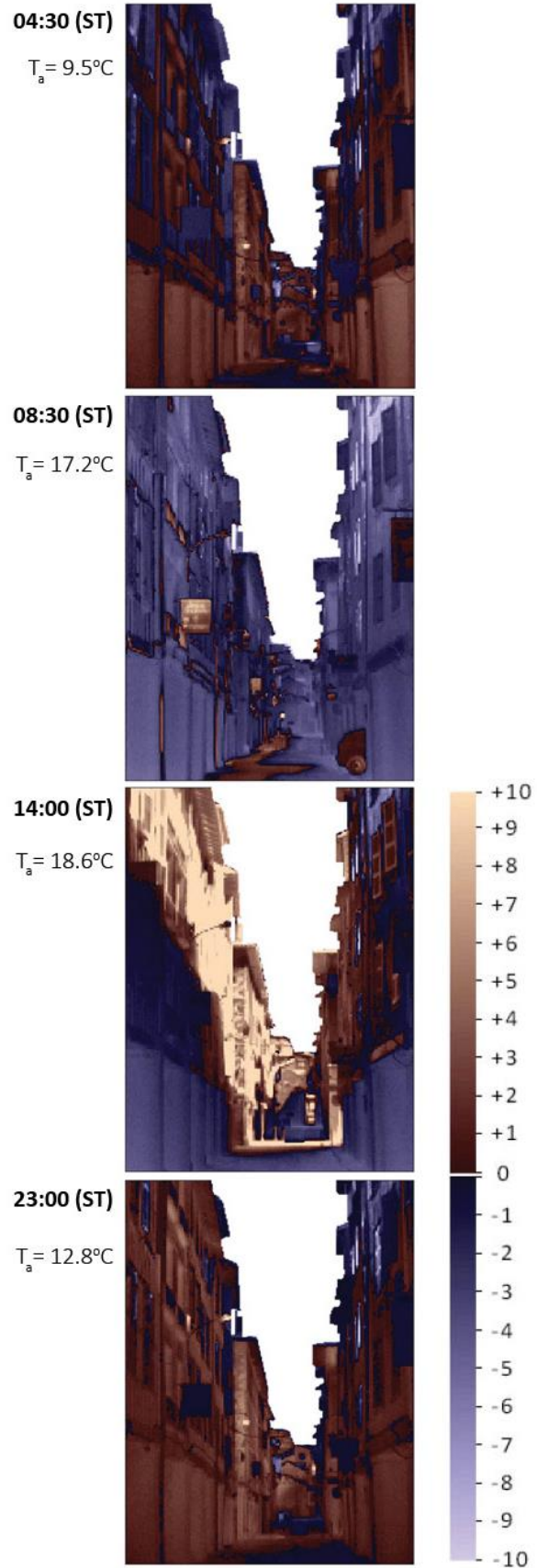


Figura 4. 25. Extracto de la secuencia de imágenes sobre el diferencial de temperatura superficie-aire (*Rue des Tonneliers* del 23/04/17).

² El diferencial con las superficies ha sido calculado con respecto a la temperatura del aire medida a una altura de 2.5m. Aunque dentro del cañón existirá una estratificación en la temperatura del aire, las diferencias de temperatura durante el día dentro de cañones profundos es casi independiente de la altura (Georgakis & Santamouris 2010).

[Análisis basado en gráficos numéricos]

Valoración de la heterogeneidad de las temperaturas de la escena

La Figura 4.26 representa el rango en que se mueven las temperaturas aparentes de las 6 áreas de interés de nuestra escena a lo largo de la jornada. En estos gráficos, se evidencia la **notable variabilidad de temperaturas** que puede existir en la termografía de ambientes urbanos. En nuestro caso, las diferencias instantáneas de temperatura superficial pueden superar los 40°C dentro de una misma zona (ej. 43.3°C en la fachada Sur a las 16:30).

En la Figura 4.26, se muestran los valores extremos de temperatura registrados en cada toma, así como el rango en el que se encuentra el 90% de los píxeles. La existencia de una cierta proporción de píxeles con temperaturas aparentes que difieren de las que presentan la mayoría de los píxeles de su zona puede explicarse por varias razones:

- Por la **heterogeneidad material** de las superficies de la escena. En un ambiente urbano real, los materiales presentan emisividades que pueden ser muy diferentes entre sí (ej. elementos metálicos con emisividad más baja que el resto de la escena). En este estudio, sin embargo, la emisividad se fijó en 1 para toda la imagen. Como consecuencia, aparecen diferencias de temperaturas aparentes (a pesar de que la temperatura “real” pueda ser la misma).
- Por la **aparición puntual de objetos** en la escena. Los elementos que solo forman parte de la escena de forma temporal pueden presentar comportamientos ajenos a la lógica general de la misma (ej: persiana que se abre) o estar gobernadas por procesos energéticos diferentes al resto de las superficies (ej: coches, farolas, peatones (Figura 4.27)).
- Por el **“ruido” introducido por los píxeles cercanos al límite entre zonas**. La temperatura del píxel puede ser el promedio de temperaturas de dos elementos con temperaturas muy dispares por la dimensión del píxel. Además, la división manual entre zonas puede incluir erróneamente píxeles en las zonas anexas. El ejemplo más notable de esta situación se observa en el caso de las *cubiertas* y del *cielo*, donde las inter-zonas construido-cielo llevan a valores de temperatura no representativos (Figura 4.26).
- La existencia de elementos cuya orientación individual es diferente a la de la zona de análisis. Este hecho puede conducir a notables **diferencias en la radiación recibida** y, con ello, a variaciones significativas en el patrón de temperaturas aparentes. En nuestro caso de estudio, esta casuística aparece, por ejemplo, en los carteles y contraventanas orientados hacia el Oeste que existen en la fachada Sur.

La Figura 4.26 muestra que resultaría difícil deducir cualquier tendencia en el comportamiento térmico de las superficies en base a sus temperaturas extremas. Por el contrario, los rangos de temperatura entre los percentiles 5 y 95 presentan unos patrones más coherentes con los ciclos energéticos que tienen lugar en la ciudad. Por ello, a partir de ahora, utilizaremos este rango “corregido” para caracterizar la evolución térmica de las superficies.

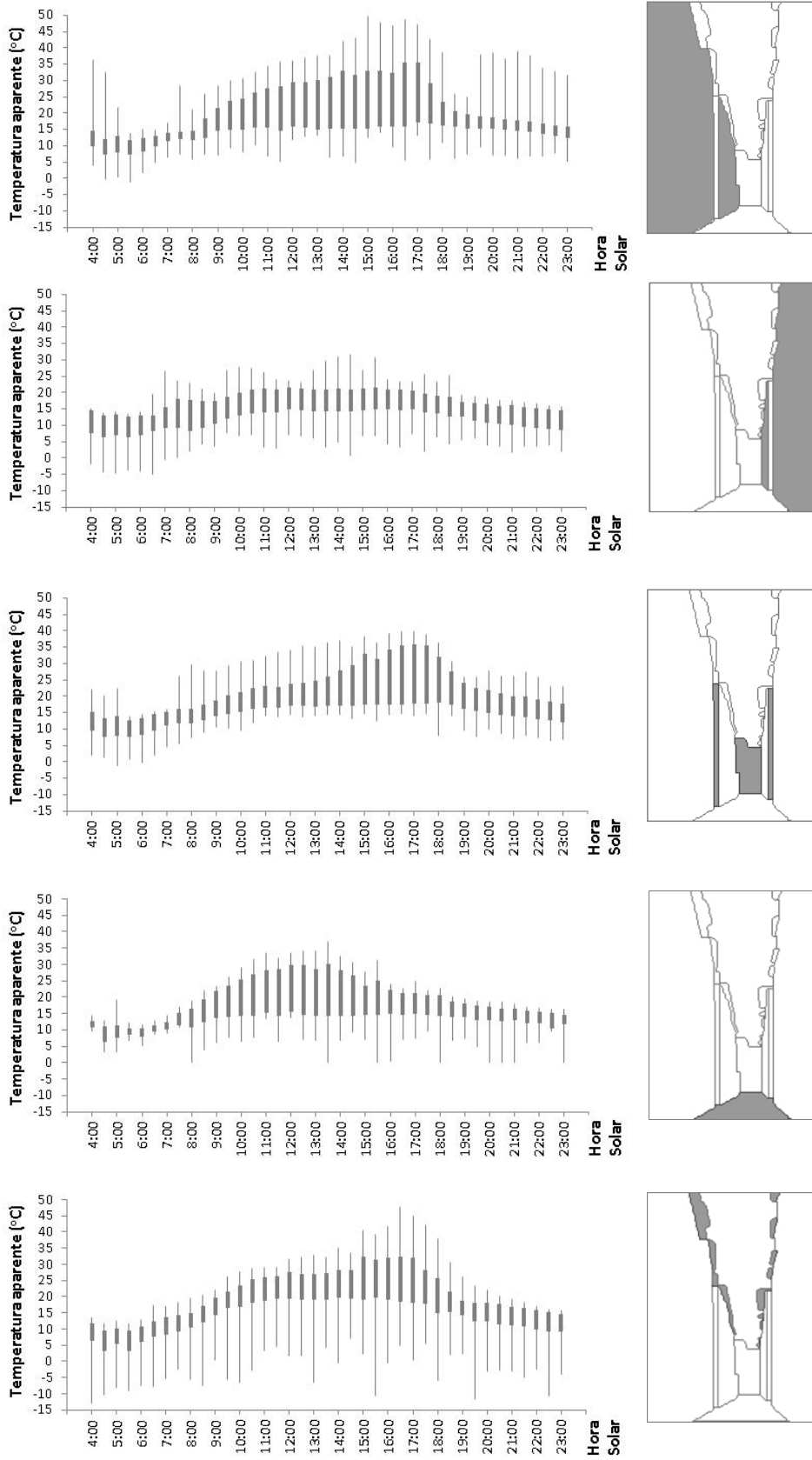


Figura 4. 26. Valores extremos (línea fina) y rango entre los percentiles 5 y 95 (línea gruesa) de las temperaturas superficiales aparentes, para las 5 áreas de interés correspondientes a elementos construidos.

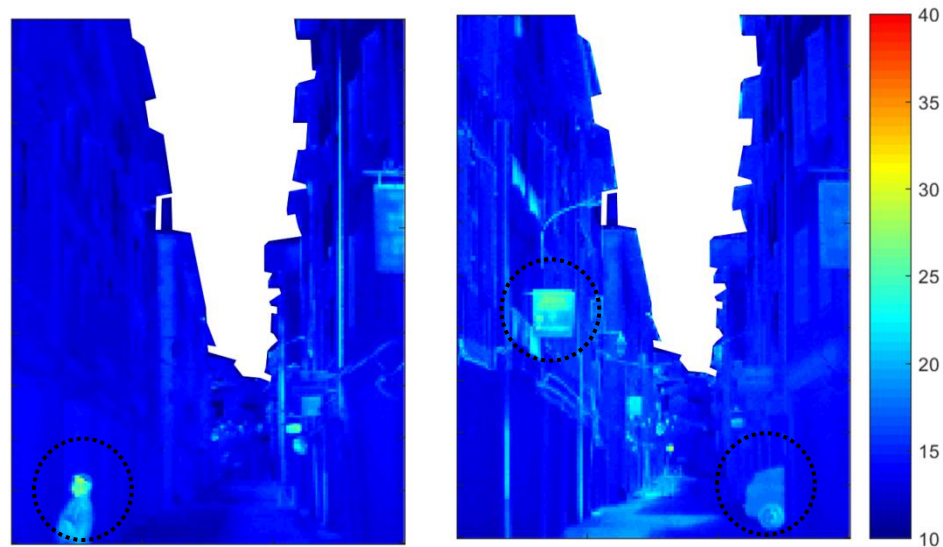


Figura 4. 27. Termografías con elementos temporales no arquitectónicos.

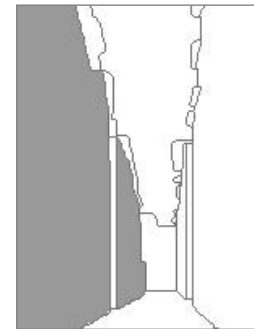
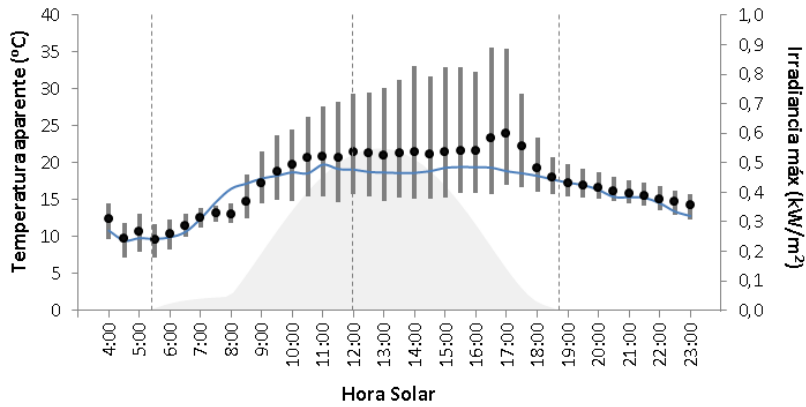
Evolución de las temperaturas aparentes de las fachadas

La Figura 4.28 muestra las temperaturas superficiales aparentes de las fachadas de la escena urbana estudiada, una vez filtrados los píxeles extremos. Para enriquecer las posibilidades de análisis, en estos gráficos se incluyó información de dos variables ambientales: la temperatura del aire y de la máxima radiación que recibiría un plano sin obstrucción con la misma orientación de la fachada.

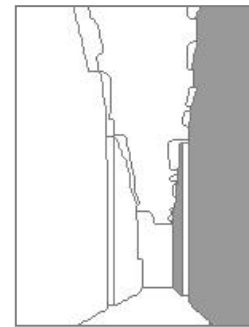
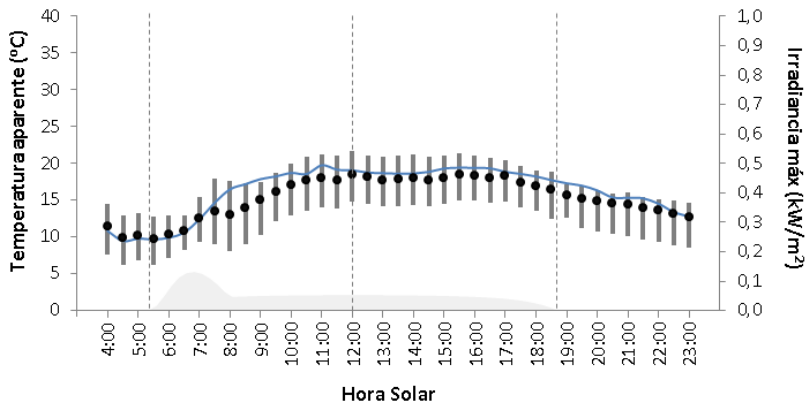
Al igual que se desprendió del análisis cualitativo de la secuencia de imágenes, los resultados cuantitativos evidencian dos comportamientos diferenciados en función de que la superficie reciba o no radiación solar directa. Durante la noche o cuando las superficies están en sombra, éstas presentan en promedio una temperatura similar a la del aire (diferencia $<3.5^{\circ}\text{C}$) y una variabilidad más reducida (de entre 2.2 y 9.5°C en las fachadas Sur y Norte, respectivamente). En cambio, cuando las fachadas reciben radiación solar directa, se produce un aumento de su temperatura media ($T_{\text{promedio MAX.}} = 25.6^{\circ}\text{C}$ en fachada Oeste), así como del rango de temperaturas (alcanzándose hasta 19.8°C en la fachada Sur).

En nuestro caso de estudio, las tres fachadas reciben radiación directa durante algún momento de la jornada. Sin embargo, la cantidad de energía incidente sobre la Norte es mucho menor que sobre las Sur y la Oeste. Como consecuencia, estas dos últimas fachadas presentaron mayores amplitudes de temperatura que la Norte (de hasta 28°C). De este comportamiento, se deduce que, durante el día, el cambio de temperatura superficial está gobernado por su capacidad de absorber energía, y que ésta proviene principalmente de la componente directa del sol, mientras la difusa y la reflejada representan una mínima aportación debido a la elevada obstrucción del entorno y su reducida reflectividad.

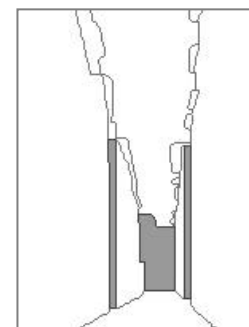
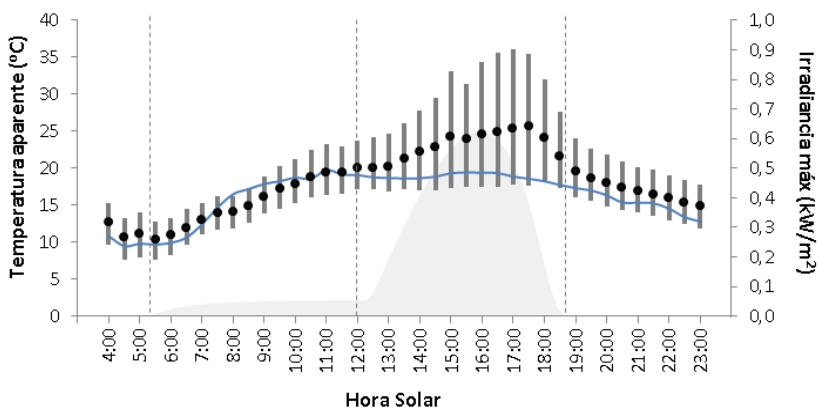
FACHADA SUR



FACHADA NORTE



FACHADA OESTE



- Maxima Irradiancia por orientación
- T^a Aire (°C)
- Rango y Promedio de T^a Sup. (°C)

Figura 4. 28. Promedio y rango corregido de temperaturas superficiales en las fachadas Sur, Norte y Oeste de la Rue des Tonneliers de Bayona (23/04/2017).

En cuanto a la relación entre temperaturas aparentes y temperatura del aire, detectamos igualmente dos patrones diferenciados. Por un lado, en las fachadas Sur y Oeste, las temperaturas aparentes son superiores a las temperaturas del aire durante la mayor parte de la jornada, excepto durante las primeras horas de la mañana (entre las 7:00 y las 10:00). Este hecho es explicable por la reducida capacidad térmica del aire que le permite cambiar su temperatura más rápidamente que a las superficies construidas. Por otro lado, en la fachada Norte, encontramos la relación inversa entre las temperaturas aparentes y las del aire. En este caso, la superficie está aparentemente más fría que el aire durante casi toda la jornada, exceptuando las últimas horas de la noche, justo antes de la salida del sol.

En la valoración de los resultados, debe tenerse en cuenta la diferencia en los ángulos bajo los que se observan las diferentes regiones. En el *Capítulo 2*, se anticipó que este aspecto puede ser relevante, ya que conlleva una infravaloración de las temperaturas para ángulos de observación rasantes. Así pues, podríamos asumir que el desfase entre temperatura aparente y temperatura real en las fachadas Norte y Sur será mayor que en la Oeste. Esto implicaría, por ejemplo, que la relación entre las temperaturas superficiales y la temperatura del aire pudiera ser diferente.

Evolución de las temperaturas aparentes del pavimento (Figura 4.29)

Durante la jornada, el pavimento presentó, en promedio, temperaturas superficiales similares a las del aire, aunque ligeramente más frías. Como ocurría en fachada, la ausencia o presencia de radiación solar es el fenómeno ambiental que explica la variación en el rango de temperaturas (que oscila entre 2 y 16°C). De este comportamiento se deduce que, a pesar de que la radiación solar llega a incidir sobre ciertas zonas del pavimento, su extensión es tan limitada que no cambia el comportamiento medio de la superficie, más parecido al de un plano en sombra (\approx fachada Norte).

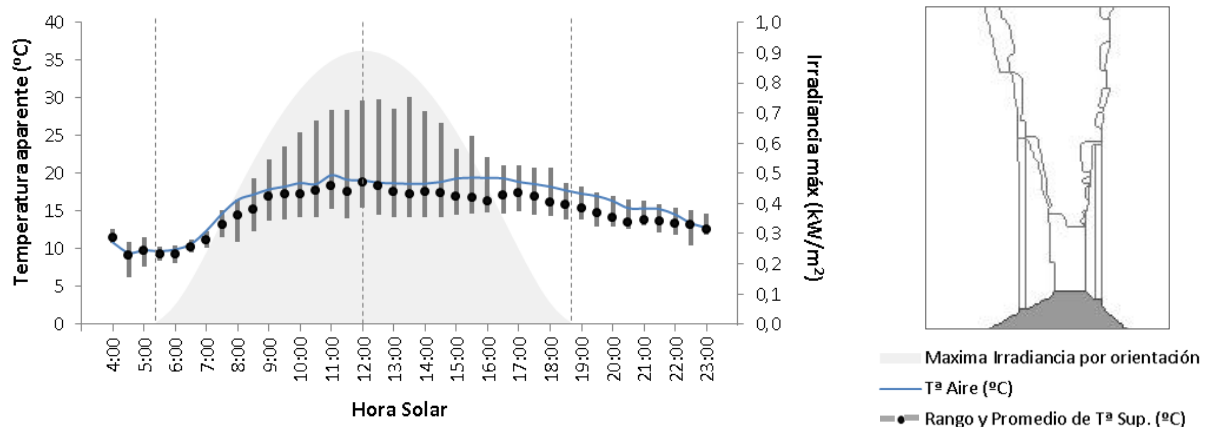


Figura 4. 29. Promedio y rango corregido de $T^{\text{ª}}$ sup. en el pavimento de la *Rue des Tonneliers* de Bayona (23/04/2017).

Evolución de las temperaturas aparentes de las cubiertas (Figura 4.30)

Las cubiertas son superficies con inercia reducida y expuestas a flujos de energía muy dispares (con posibilidad de grandes pérdidas radiativas hacia el cielo y de notables ganancias solares). Este hecho explica, por un lado, que en ellas se registren las temperaturas más bajas de la escena (excluyendo el cielo), llegando hasta los 4°C, y, por otro, que durante gran parte del día su temperatura promedio sea mayor que la del aire. Se observa que el comportamiento de las cubiertas visibles en nuestra escena se asimila al de fachada Sur, ya que recibirán radiación cuando esta fachada lo haga.

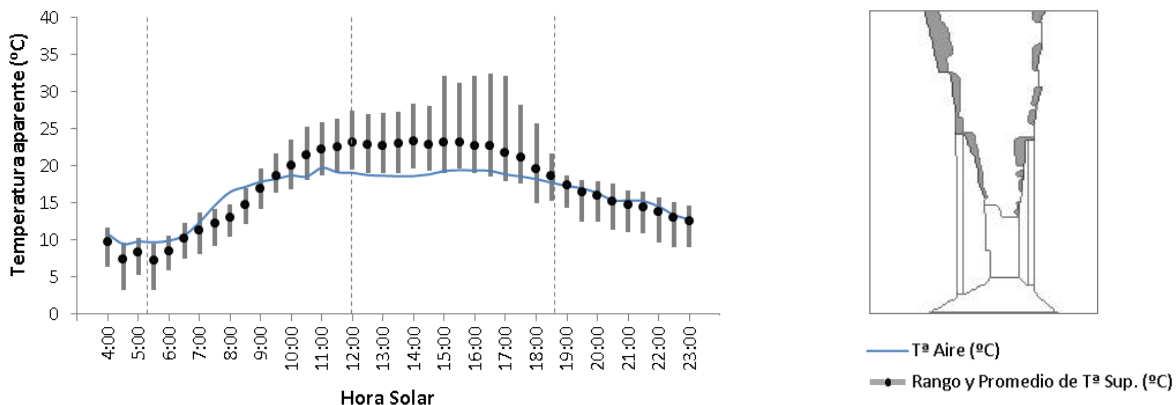


Figura 4. 30. Promedio y rango corregido de Tª sup. de la parte visible de las cubiertas de la *Rue des Tonneliers* de Bayona (23/04/2017).

Evolución de las temperaturas del cielo visible en la termografía

La Figura 4.31 muestra las temperaturas aparentes de la zona del cielo de la escena estudiada en relación a la temperatura del aire. Durante las mediciones, el cielo constituyó la parte más fría de la escena ($-32^{\circ}\text{C} < T_{\text{cielo}} < 10^{\circ}\text{C}$), con diferencias de hasta 60°C con las superficies construidas (ej. Fachada Sur cuando recibe radiación directa). Además, el cielo fue el área de la imagen donde se encontraron las variaciones más extremas de temperatura, con una diferencia entre el punto visible más frío y más cálido de entre 25 y 33°C , según el momento de la jornada.

Los resultados muestran que la evolución a lo largo de la jornada de la temperatura del cielo visible en la termografía guarda una relación con la del aire, aunque con temperaturas sensiblemente más bajas (entre 28 y 36°C menos). Las diferencias de temperaturas aire-cielo fueron mayores en las horas centrales del día, coincidiendo con el ascenso de las temperaturas del aire y, por tanto, con el descenso en la humedad relativa. Este comportamiento es consistente con los modelos de cielo de la bibliografía, en los que un mayor contenido de vapor de agua en el aire se relaciona con mayores temperaturas de cielo (Bliss 1961).

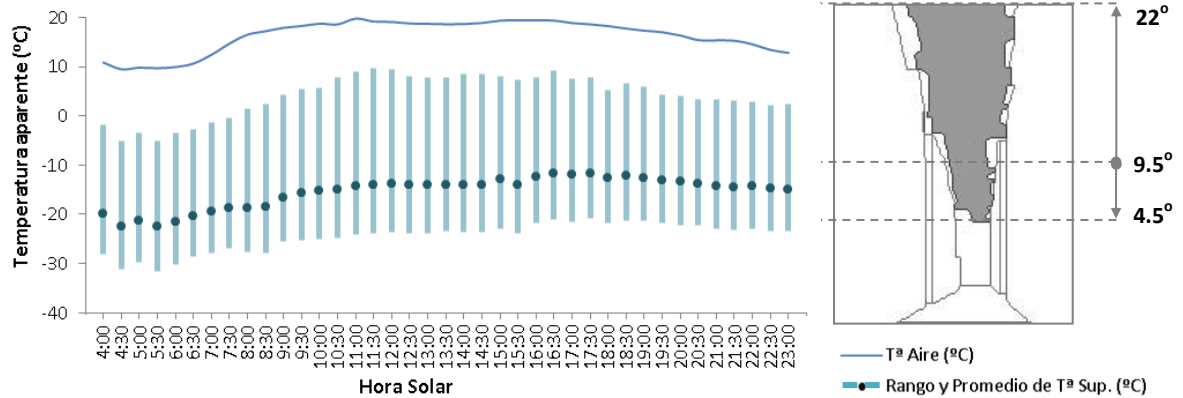


Figura 4.31. Promedio y rango corregido de temperaturas superficiales en la parte visible del cielo de la *Rue des Tonneliers* de Bayona (23/04/2017).

Por la posición de la cámara y las obstrucciones de los edificios, la parte del cielo visible en nuestra escena está comprendida entre unos ángulos de elevación de 4.5° y 22° . En condiciones de cielo despejado, como las del día de medición, la bóveda celeste debería presentar un gradiente de temperaturas² entre el horizonte (zona más cálida) y el cenit (zona más fría), como se describe en (Bliss 1961; Berger et al. 1984).

Según la bibliografía, la temperatura del horizonte sería próxima a la temperatura del aire, mientras que la temperatura del cenit, mucho más baja, podría alcanzar valores cercanos a los -50°C (Kruczek 2015). Así pues, extrapolando a nuestro caso de estudio, podíamos suponer que la temperatura de la bóveda celeste para los 0° sería similar a la registrada para el aire (Figura 4.31). En cuanto a la temperatura del cenit, no es posible realizar una aproximación tan inmediata como en el caso del horizonte, pero sí podemos asegurar que ésta sería inferior al mínimo mostrado en la imagen ($T_{\text{cenit}} < -32^{\circ}\text{C}$).

En la Figura 4.32 se muestra el perfil de las temperaturas de cielo medido sobre la termografía de las 12:00h según su elevación. A la altura de horizonte ($\alpha = 0^{\circ}$) se ha indicado la temperatura del aire a esa hora a modo de referencia. El gráfico se completa con dos curvas adicionales: las temperaturas obtenidas por (Kruczek 2015), a partir de mediciones con una cámara infrarroja y una extrapolación logarítmica de nuestras mediciones. Esta información nos servirá como soporte para la discusión sobre la variación angular de la temperatura del cielo.

² Según la hoja de especificaciones proporcionada por la casa comercial de la cámara con la que fueron realizadas las mediciones, el dispositivo tiene una precisión de $\pm 2^{\circ}\text{C}$ o $\pm 2\%$ de la lectura para valores de temperatura entre -20°C y $+120^{\circ}\text{C}$. Sin embargo, durante las mediciones realizadas en la *Rue des Tonneliers*, la cámara proporcionó valores de temperatura inferiores, hasta -30°C . Este aspecto fue consultado (Question Reference # 180404-000047) al servicio técnico de FLIR (FLIR & Co. 2017), quien aclaró que, aunque por debajo de -20°C no puedan garantizar el mismo nivel de precisión, los valores hasta -30°C pueden considerarse confiables.

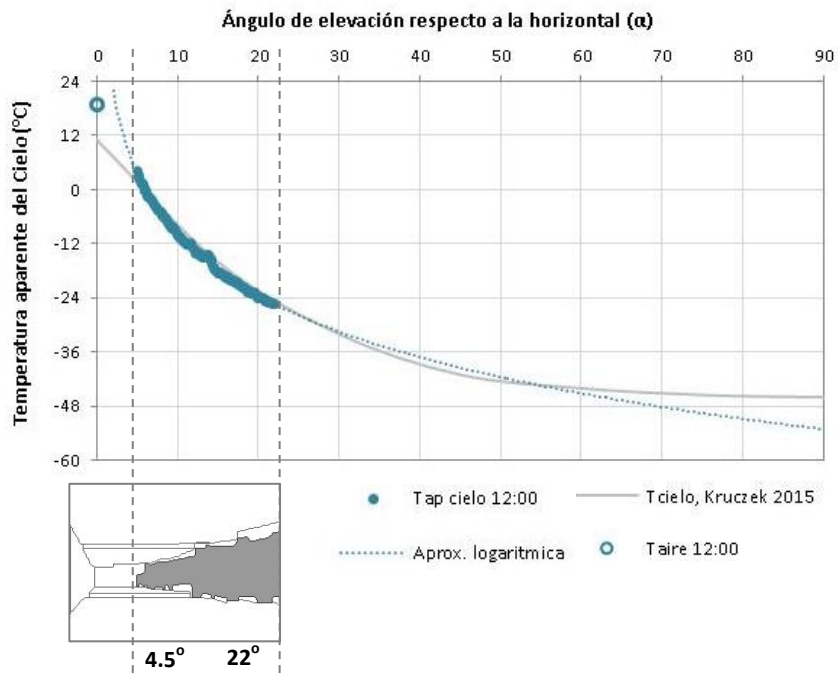


Figura 4. 32. Temperaturas del cielo en función del ángulo de elevación con respecto al horizonte. Comparación entre mediciones a las 12:00 en la Rue des Tonneliers (azul) y referencia bibliográfica de Kruczek 2015 (gris).

Según la curva de (Kruczek 2015), pequeñas diferencias angulares cerca del horizonte se asocian con notables variaciones de la temperatura aparente (en nuestro caso, las temperaturas bajan casi 30°C al cambiar la elevación en 17.5°). Conforme nos acercamos al cenit, la dependencia angular de la temperatura disminuye, sobre todo a partir de los 50° . La aproximación logarítmica no es capaz de reproducir esta tendencia, por lo que no resulta adecuada para ángulos cercanos al cenit. Sin embargo, en vista de la correspondencia entre nuestras mediciones y las de Kruczek, podríamos anticipar que en nuestro caso el cenit podría alcanzar los -50°C .

4.2.5 Comentarios finales del caso de estudio

En este caso de estudio, se ha evaluado el comportamiento térmico de las superficies urbanas de la *Rue des Tonneliers* de Bayona. La base del trabajo consistió en una campaña de termografías realizada durante un día despejado de primavera (23 de abril de 2017).

La discusión de los resultados experimentales se complementó con información adicional generada a partir de un modelo geométrico 3D de la zona de estudio empleando el software HELIODON 2 (Beckers & Masset 2006). Por un lado, se evaluaron los factores de vista entre superficies, como descripción del nivel de oclusión del entorno y descriptor de los intercambios radiativos difusos. Por otro, se realizaron simulaciones de radiación directa incidente sobre las superficies para el día de la medición con condiciones de cielo despejado, para ayudar a la interpretación de los resultados de las termografías.

[A partir del análisis basado en imágenes: distribución espacio-temporal de temperaturas]

La información de las termografías fue procesada de diversas formas en función del aspecto a estudiar. **En primer lugar, se estudió una secuencia** de fotografías y termografías con una escala común de temperatura para proporcionar una visión de los procesos radiativos en ondas cortas y largas a lo largo de la jornada. A partir de este trabajo se identificaron los tres principales fenómenos que gobiernan las temperaturas aparentes de las superficies bajo condiciones de cielo despejado y en ausencia de viento: absorción de radiación solar, visión del cielo e inercia.

En una segunda etapa, se estudió la repercusión de los **factores geométricos y materiales sobre la distribución de temperaturas**. Para ello, se compararon termografías individuales con cálculos de radiación solar y *sky view factor* realizados sobre un modelo 3D del entorno de Tonneliers. Se mostró que la temperatura superficial puede variar 8°C por las diferencias de obstrucción solar entre dos puntos similares muy próximos entre sí, y 5°C por los cambios en la cantidad de cielo visible. La magnitud de estas variaciones de temperatura recalca el carácter predominante de los flujos en onda corta y la importancia no despreciable de los flujos en onda larga.

Finalmente, se graficó el diferencial de **las temperaturas entre el aire y las superficies**. Los resultados mostraron que, durante la noche, una gran parte de las superficies se encuentran más calientes que el aire, mientras que, durante el día, sólo algunas lo estarán (las que reciben más radiación). Se evidenció que las diferencias de temperatura aire-superficie -y con él la magnitud de los intercambios por convección- pueden variar de forma notable no sólo entre distintas orientaciones, sino dentro de la misma dependiendo de la altura.

[A partir del análisis basado en gráficos numéricos: caracterización térmica del cañón]

La escena urbana de estudio fue segmentada en diversas regiones, sobre las que se estudió el promedio y el rango de temperaturas a lo largo de la jornada. De manera general, las temperaturas promedio más elevadas y con mayor heterogeneidad se registraron en aquellas superficies sobre las que incidía la radiación solar directa. Así, las fachadas Sur y Oeste presentaron una temperatura

media más alta y una mayor variabilidad térmica que la Norte, con diferencias de casi 20°C dentro de la misma fachada. Las temperaturas superficiales más altas se registraron en la fachada Oeste y Sur ($T_{MAX} = 36^{\circ}C$, 7°C por encima del aire) y las más frías en cubierta ($T_{MIN} = 4^{\circ}C$, 7°C por debajo del aire), por su mayor visión de cielo.

[Reflexiones globales sobre el caso de estudio]

En entornos compactos y con baja reflectividad, como el estudiado:

- Existen diferencias notables entre los flujos radiativos de los distintos puntos, con notables diferencias entre fachadas y también dentro de la misma.
- La morfología del entorno juega, por tanto, un papel clave en relación a las temperaturas de las superficies, no sólo a nivel de obstrucción solar, sino también de la visión del cielo.
- El estudio de las temperaturas superficiales – sobre todo en simulación- debe basarse en modelos urbanos donde sus características morfológicas se reproduzcan con un nivel de detalle suficiente, alejados del enfoque tipológico.
- La heterogeneidad material sólo se traducirá en “heterogeneidad térmica” local en aquellos planos expuestos a radiación directa, por la poca importancia de la radiación reflejada.

4.3 CASO DE ESTUDIO 2: CALLE DE LAS REJAS DE DON GOME, CÓRDOBA

4.3.1 Descripción del caso de estudio

El trazado de una notable extensión de la Córdoba actual es de origen medieval. La “esencia morfológica” original de esta parte de la ciudad, con un viario intrincado y una elevada compacidad, ha sobrevivido al paso del tiempo durante siglos y es fácilmente distinguible de las extensiones urbanas posteriores al s. XIX (Figura 4.33). En el ámbito de la tesis, este tejido resulta de especial interés por tratarse de un ejemplo bien conservado de trama compacta de origen árabe, presente en numerosas ciudades mediterráneas. Como caso de estudio, se ha seleccionado la *Calle de las Rejas de Don Gome*, situada en el barrio de la *Santa Marina*, zona del casco histórico con un trazado originario del siglo IX.

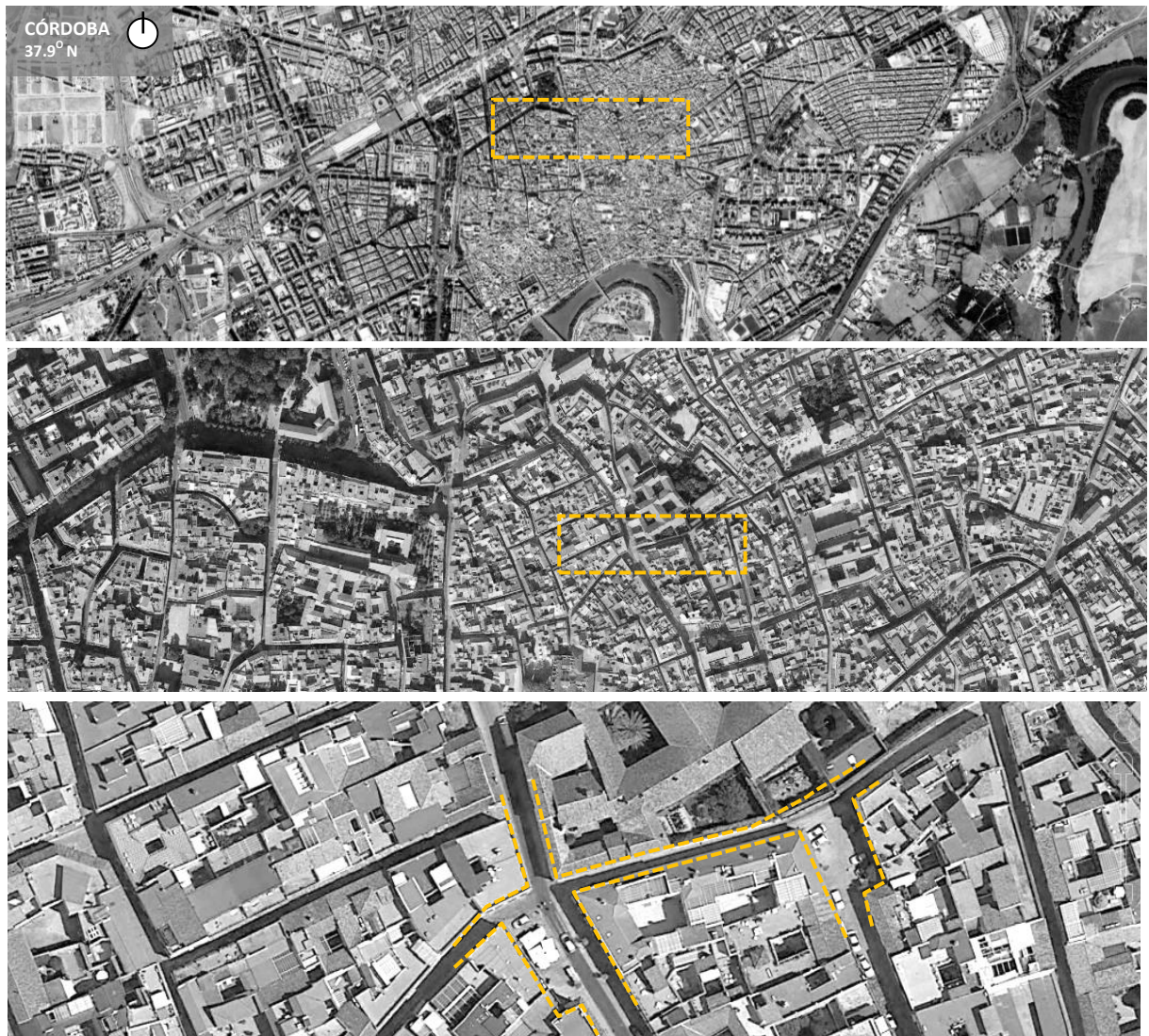


Figura 4. 33. Imágenes aéreas a diferentes escalas de la *Calle de las Rejas de Don Gome* en la ciudad de Córdoba.

[Selección del punto de medición]

El interés de este emplazamiento para llevar a cabo una campaña de medición de las temperaturas superficiales se justifica desde varios puntos de vista.

Representatividad de la escena enfocada

En esta calle, se pueden identificar las principales características morfológicas y materiales del tejido urbano de estudio. Se trata de una calle con edificaciones de baja altura (2-3 plantas) que conforman una sección transversal estrecha, asimétrica y de perfil variable (Figura 4.34 y Figura 4.35). Además, en la calle existen cambios de orientación generando una sucesión de tramos de longitud limitada (en nuestro caso, 60m). Finalmente, la materialidad de esta escena urbana es representativa de su entorno: paramentos verticales poco perforados, muy reflectivos, con pavimentos oscuros.



Figura 4. 34. Fachada Sur (izquierda) y Norte de la *Calle de las Rejas de Don Gome* (22/02/18).



Figura 4. 35. Panorámica de la intersección de la *Calle de las Rejas de Don Gome* con la *Calle Enrique Redel* (22/02/2018)

En relación a la adecuación de los medios técnicos al entorno

Al trabajar con aperturas angulares pequeñas (en nuestro caso, 25°), la reducida longitud de las calles del entorno supuso un impedimento a la hora de encontrar ubicaciones factibles para el estudio, ya que no era posible alejarse lo suficiente para enfocar las fachadas en toda su altura. En nuestro caso, las proporciones longitud-ancho-alto de la calle elegida permiten encuadrar una escena urbana con un buen compromiso entre la distancia de enfoque y el ángulo de observación.

En relación a la operatividad del emplazamiento

A excepción de la parte más turística, el casco histórico de Córdoba está abierto casi en su totalidad a la circulación rodada, lo que reduce significativamente el número de emplazamientos de medición disponibles. Esta calle, limitada en sus extremos Este y Oeste por plazas, presenta en este sentido ciertas ventajas con respecto a otras ubicaciones. Concretamente, nos ubicamos en el extremo Oeste de la calle, ya que la configuración de este espacio público posibilita la colocación de los dispositivos de medición alineados con el eje de la calle y sin interrumpir la circulación.

[Caracterización del entorno urbano seleccionado]**Características geométricas del entorno urbano**

El tramo estudiado de la *Calle de las Rejas de Don Gome* discurre de Este a Oeste, con una desviación de 15° hacia el Norte. Este cañón urbano está limitado por dos planos verticales orientados hacia Norte (N-15°) y Sur (S-15°) y el plano horizontal del pavimento. Al fondo de la escena, aparece una fachada orientada hacia el Oeste (O-15°), visible a consecuencia del quiebro en el trazado de la calle.

La calle de estudio presenta alturas variables que oscilan entre los 5.3m y los 9.5m, con un promedio de 6.7m. Entre las dos plazas que limitan el tramo de calle analizado, la distancia entre fachadas es constante, de unos 3.55m. En base a estas dimensiones, la calle tendría una relación de aspecto promedio W/H (ancho/alto) de 0.53, lo que proporciona una idea inicial aproximada del grado de obstrucción del entorno urbano analizado (Figura 4.36)



Figura 4. 36. Sección transversal promedio de la *Calle de la Reja de Don Gome*

Para refinar la interpretación de los resultados, se levantó un modelo 3D interactivo (Beckers 2013), de tipo morfológico, a partir tres fuentes de información. Por un lado, el parcelario catastral se tomó como información 2D de base. Por otro, se realizaron mediciones *in-situ* sobre la configuración de las fachadas del entorno (alturas de cornisa, dimensión de aleros, distribución de huecos). Finalmente, la volumetría del modelo se completó con información 3D obtenida desde *Google Earth Pro*. Esta fuente proporcionó los datos necesarios para modelar aquellos elementos arquitectónicos no accesibles desde la calle (forma, altura y pendiente de cubiertas). El resultado fue el modelo de CAD que se muestra en la Figura 4.37, , cuyo nivel de detalle corresponde al LOD3.1 (Biljecki et al. 2016).

Dicho modelo 3D sirvió para caracterizar geoméricamente el entorno urbano del caso de estudio. El indicador geométrico empleado ha sido el factor de forma o de vista entre superficies, un parámetro que condiciona de manera clave los intercambios radiativos de tipo difuso.

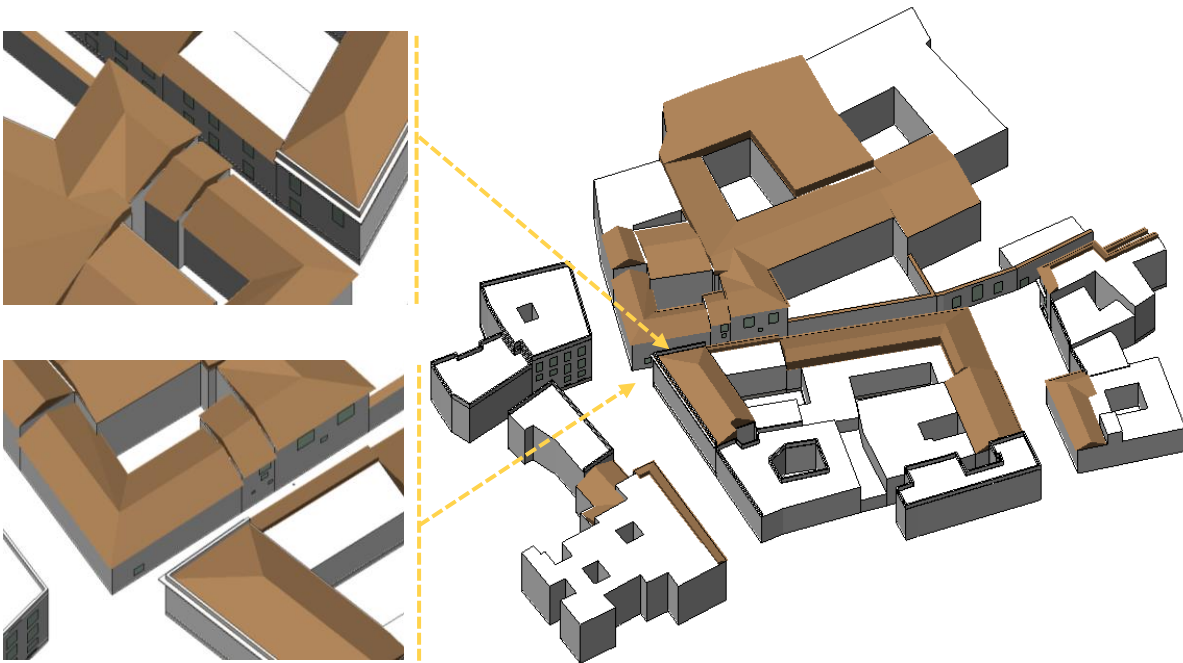


Figura 4. 37. Modelo 3D interactivo CAD de la Calle de las Rejas de Don Gome (Córdoba).

Este modelo se utilizó con una doble finalidad. Por un lado, para calcular los factores de vista entre las fachadas y el resto de las superficies de la escena urbana se calculó por medio del software HELIODON 2 (Beckers & Masset 2006). Se analizaron mapas de distribución de los factores de vista y también se cuantificaron valores en ciertos puntos de interés. Por otro lado, se llevaron a cabo simulaciones de radiación en ondas cortas, teniendo en cuenta las componentes directa del sol, difusa del cielo y reflejada del entorno, en el software RADIANCE (Ward Larson & Shakespeare 1998). Los resultados de ambos análisis se mostrarán en posteriores apartados.

Características materiales del entorno urbano

La escena urbana estudiada está compuesta por cuatro edificaciones. La fachada Sur termografiada pertenece en su totalidad al Palacio de Viana, un complejo edilicio resultante de una agregación sucesiva de patios y edificios a lo largo de varios siglos (Figura 4.39).

La fachada Norte pertenece a tres edificaciones realizadas en los años 2000, mientras que la Oeste se construyó en 1988. Estamos por tanto ante un entorno en el que conviven edificaciones erigidas en un contexto pre-normativo con otras que fueron edificadas bajo la normativa térmica NBE-79.

A partir de los años de construcción y en base a ciertas observaciones in situ (grosor de muros), podemos estimar que el sistema constructivo del primer caso es mucho más masivo, por tanto con más inercia y sin aislamiento. Mientras que en el segundo caso será más ligero, y probablemente con un cierto aislamiento, según se establecía en la Norma NBE-79.

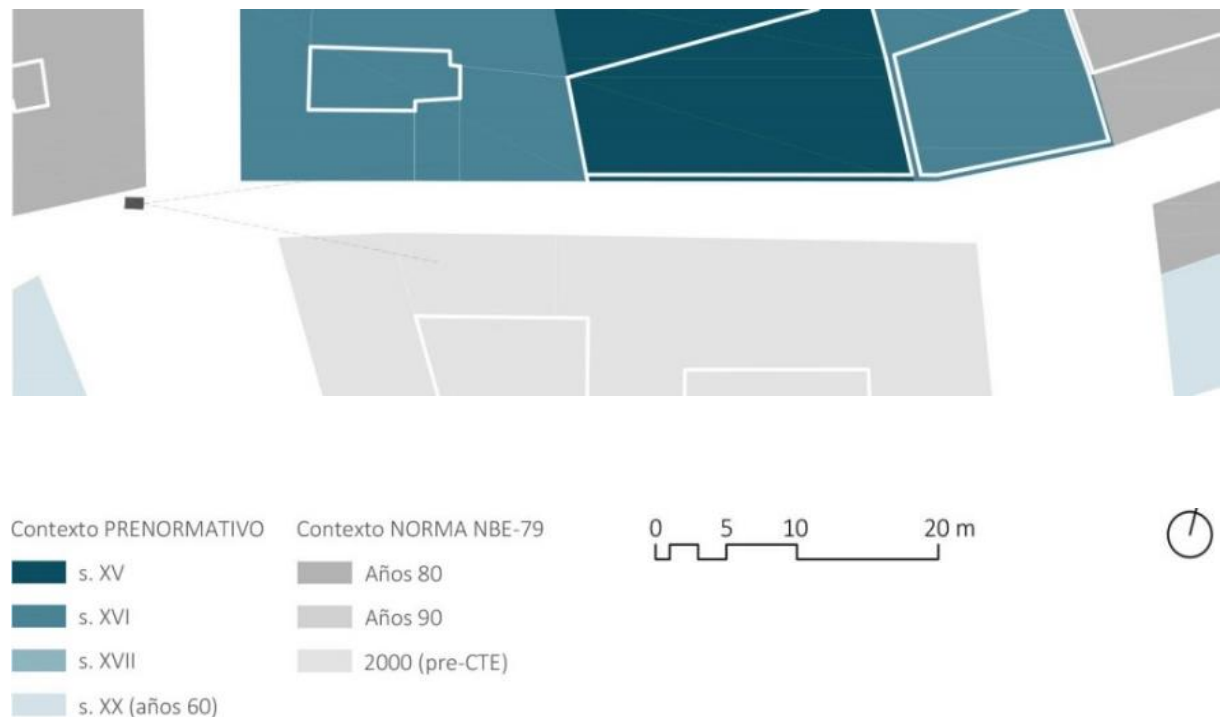


Figura 4. 38. Época de construcción de los edificios de la escena urbana de la *Calle de las Rejas de Don Gome*.

Propiedades ópticas de los materiales

Para determinar los **coeficientes de reflexión** de los materiales opacos de la escena urbana estudiada, se llevó a cabo una campaña de medición experimental, cuyos resultados se resumen en la Figura 4.40.

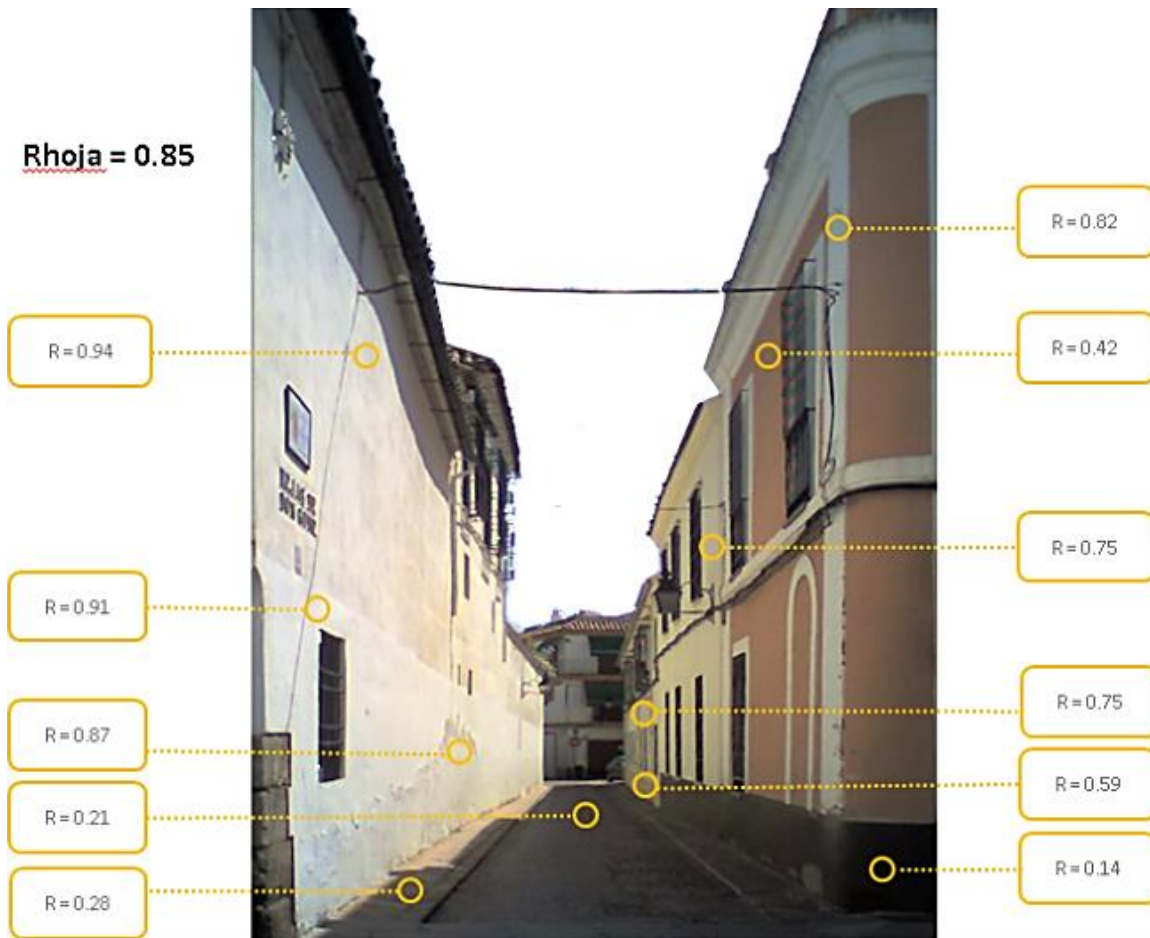


Figura 4. 39. Resumen numérico y gráfico de los coeficientes de reflectividad de la *Calle Rejas de Don Gome*.

Por lo que respecta a la reflectividad de los materiales de los huecos en fachada, se realizó una aproximación basada en su composición predominante: vidrios simples con carpinterías de madera, protecciones solares y celosías, todos ellos en color marrón oscuro (Figura 4.40). La reflectividad promedio del elemento fue valorada en un 0.11, correspondiendo al valor promedio entre la reflectividad del vidrio (0.08) y de la pintura de la madera de carpinterías y celosías (0.14).

Basándonos en los resultados de las mediciones, se asignaron coeficientes de reflexión (r) a las distintas superficies del modelo 3D del área de estudio (Figura 4.41). Teniendo en cuenta la reflectividad individual de los materiales y la superficie que estos ocupan, se ha valorado la reflectividad promedio de los planos principales que conforman la escena urbana estudiada.

En resumen, la escena estaría formada por una fachada Sur muy uniforme, de alta reflectancia y con una perforación muy pequeña ($r = 0.87$; WWR = 4%), una Norte más heterogénea, ligeramente más perforada (WWR = 16%), lo que resulta en una reflectividad media (0.58) y un pavimento de reflectividad media - baja (0.23).

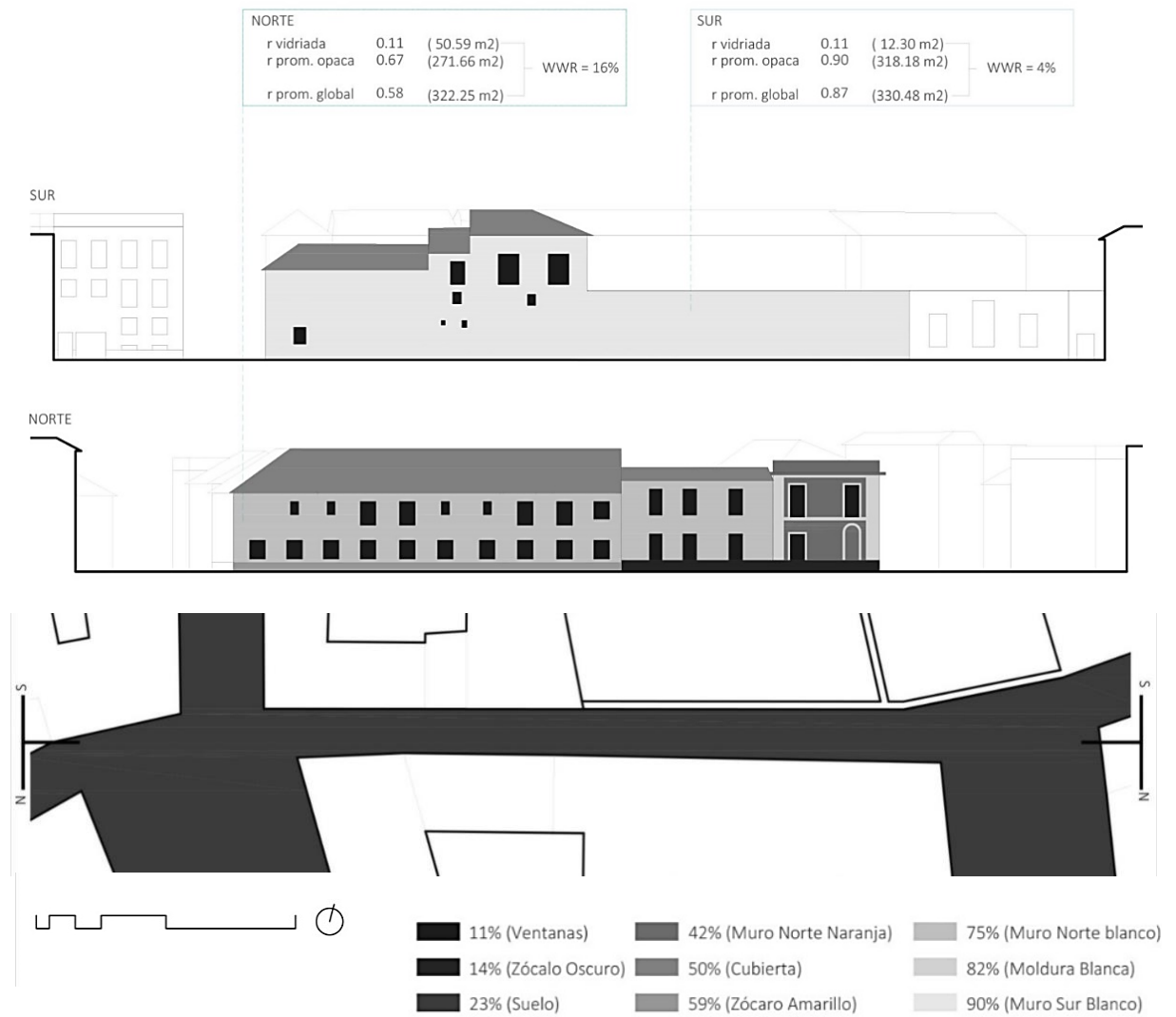


Figura 4. 40. Alzados y planta con los coeficientes de reflexión asignados al modelo 3D de la *Calle de las Rejas de Don Gome*.

4.3.2 Toma de datos experimentales

La campaña de mediciones se llevó a cabo entre las 4:00 ST y las 20:30 ST del 25 de julio de 2017 (respectivamente, las 6:00 y las 22:30 OT). Cada 30 minutos, se tomaron **fotografías y termografías infrarrojas**, obteniéndose un total de 34 tomas. En paralelo a la toma de imágenes, se midieron las **condiciones ambientales necesarias para la calibración de las termografías y la interpretación de los resultados**. En el sitio de medición, se registraron la temperatura y humedad del aire, así como la velocidad del viento a una altura de 2.5m. Los datos de radiación solar fueron extraídos de la estación meteorológica del aeropuerto de Córdoba, situada a 6.9 Km del sitio de medición.

En la campaña de medición de la *Calle de las Rejas de Don Gome* se utilizó una cámara termográfica FLIR B200 (A), un termo-anemómetro SDL350 (B) y un termohigrómetro HOBO U12 (C), cuyas características quedan descritas en el Anexo C. Estos aparatos fueron ubicados en la posición que se indica en la Figura 4.42, fijados a un trípode según la disposición que se observa en la misma figura.

La cámara se posicionó alineada con el eje de la calle con una inclinación de 10° sobre el plano horizontal, de tal forma que se encuadraba simultáneamente las fachadas Norte, Sur, el pavimento y una fracción del cielo. Para protegerla del sobrecalentamiento por la incidencia de la radiación solar, se añadió una protección que se retiraba a la hora de realizar las imágenes. En el caso del termohigrómetro, fue fijado en la parte inferior del dintel de la ventana para protegerlo de la radiación solar directa.

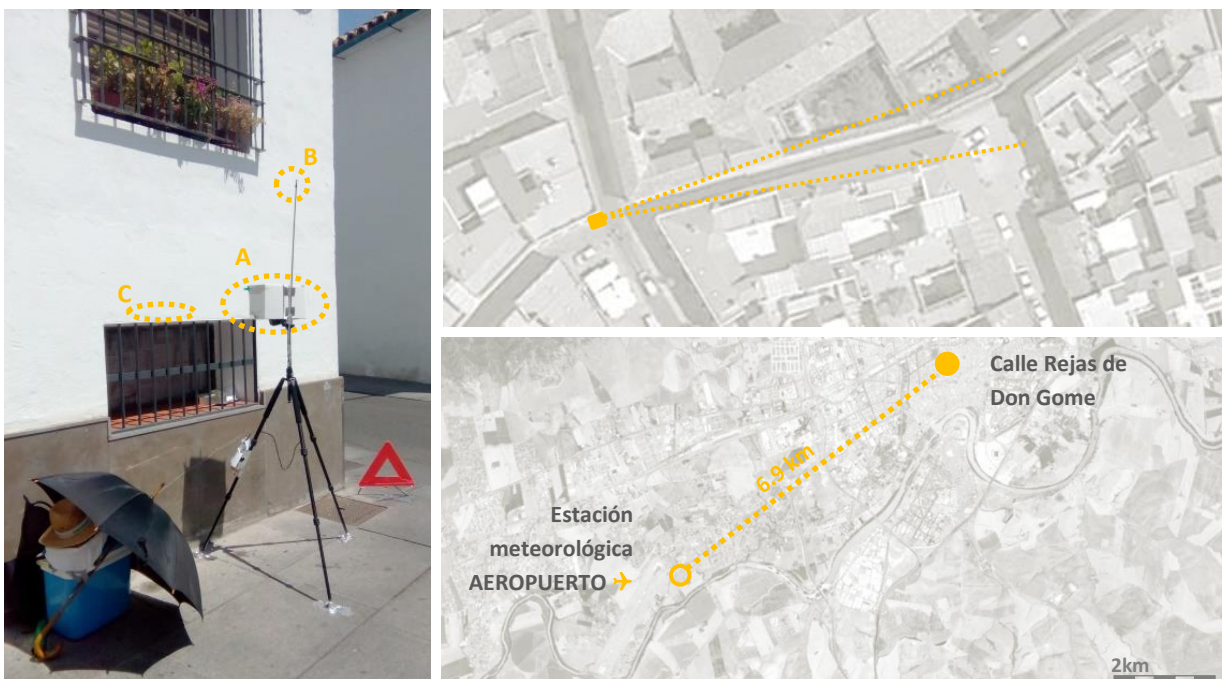


Figura 4. 41. Disposición de los equipos de medición en la *Calle de las Rejas de Don Gome* y distancia a la estación meteorológica de referencia.

[Condiciones meteorológicas medidas durante la campaña]

Temperatura y humedad del aire

El día de medición fue una jornada típica de verano en Córdoba: cielo completamente despejado y aire seco y cálido. La temperatura y humedad relativa del aire medidas a lo largo de la campaña se muestran en la Figura 4.43. Durante la medición, las temperaturas del aire oscilaron entre los 26.1°C (6:30h) y los 38.6°C (17:00h), con un promedio de 33.4°C. Por su parte, la humedad relativa promedio de la jornada fue del 38% con un máximo del 59% (5:30h) y un mínimo del 21% (18:30h).

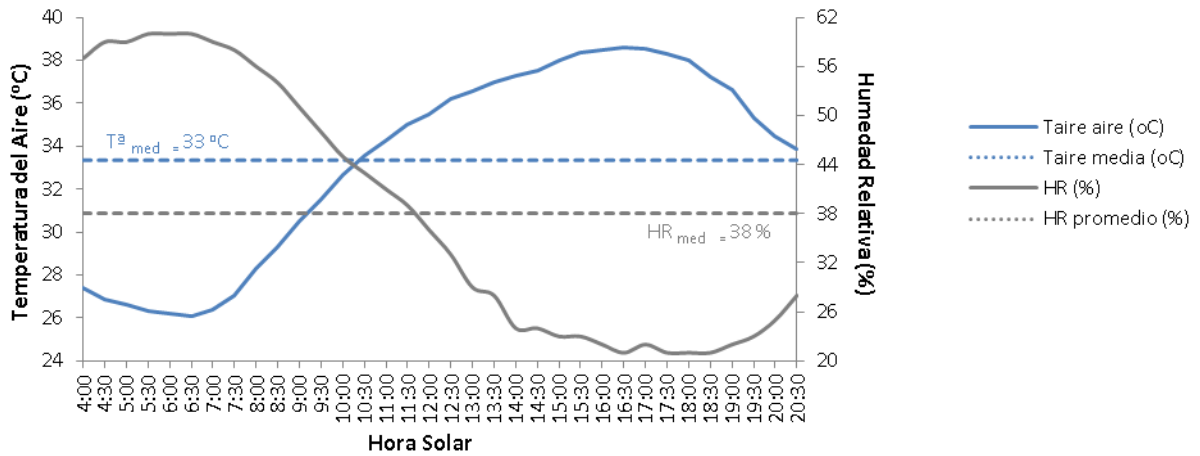


Figura 4. 42. Temperatura del aire y humedad relativa durante la medición en la *Calle Rejas de Don Gome* (25/07/2017).

Velocidad del viento

Los vientos registrados durante el día de medición fueron débiles, como se refleja en la Figura 4.44. Según la escala de *Beaufort*, se trató de una jornada “calma”, con una velocidad promedio de 0.7 m/s y algunas rachas puntuales de viento flojo hacia la última hora de la tarde (6 m/s). Las condiciones registradas se consideran aceptables para toma de imágenes termográficas (promedio < 1 m/s).

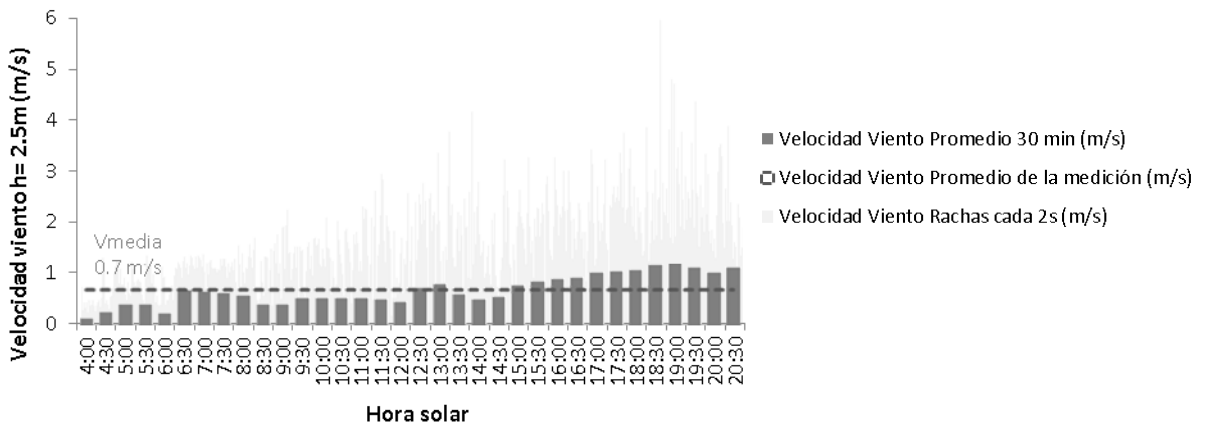


Figura 4. 43. Velocidad del viento (m/s) durante la medición en la *Calle Rejas de Don Gome* (25/07/2017).

Radiación solar

Durante la medición, el cielo estuvo completamente despejado, como muestra la gráfica de la Figura 4.45. En ella se representa la radiación global horizontal medida en la estación meteorológica del aeropuerto de Córdoba durante el día 25 de Julio de 2017.

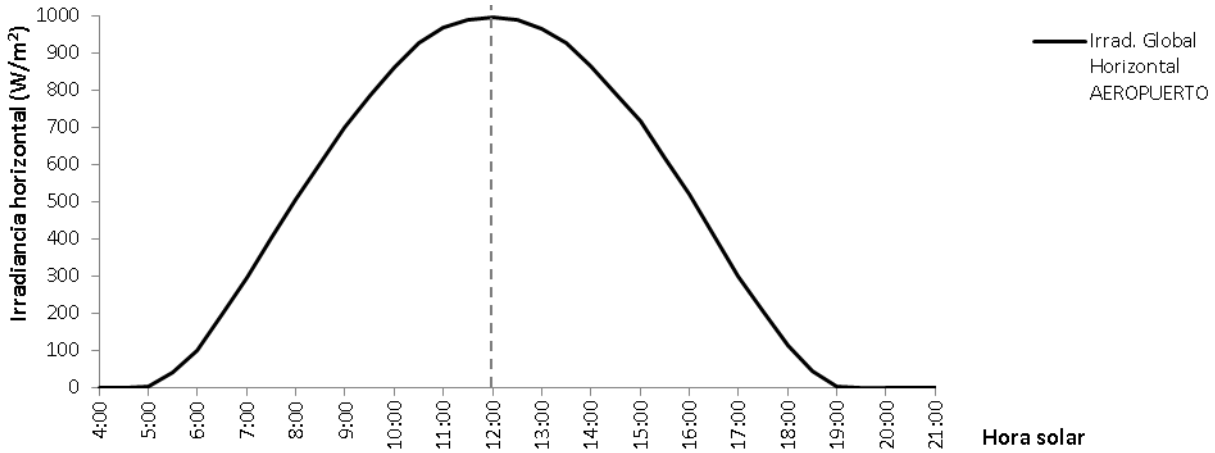


Figura 4. 44. Irradiancia horizontal (W/m²) medida en la estación meteorológica del Aeropuerto (25/07/2017).

A continuación, se muestra la radiación global y difusa horizontal para el mismo día, calculada según el modelo de cielo despejado de Liu & Jordan (1960). Los resultados obtenidos se representan conjuntamente con los datos medidos (Figura 4.46). Observamos que, ajustando la transmisividad de la atmosfera en $\tau = 0.7$, la coincidencia entre medición y cálculo es casi total, con una desviación <0.2% sobre la energía total diaria acumulada.

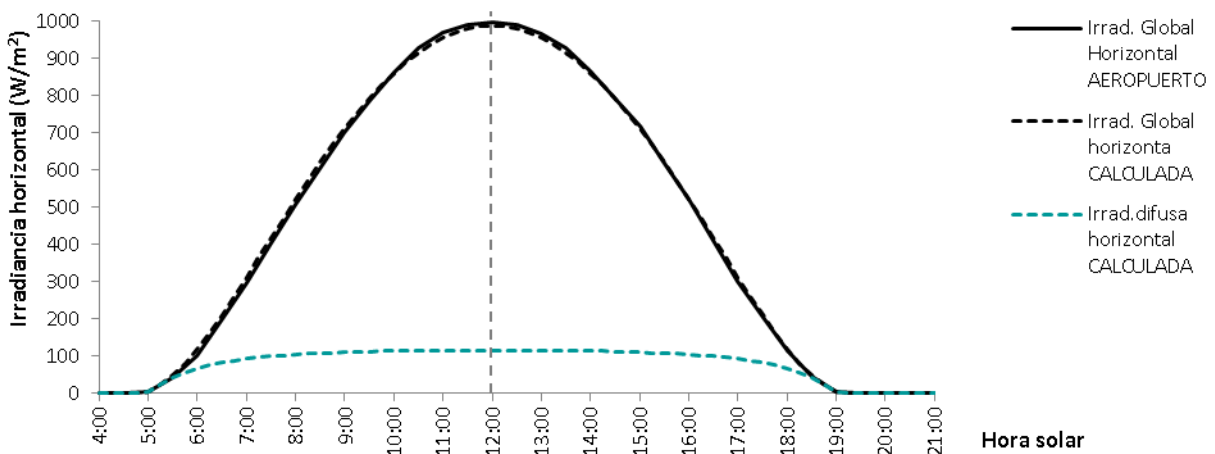


Figura 4. 45. Irradiancia horizontal (W/m²) medida en el Aeropuerto de Córdoba (25/07/2017) y calculada según el modelo de Liu Jordan para cielo despejado (25/07 en Córdoba).

Basándonos en el mismo modelo, se calculó la irradiancia global sobre plano vertical para las orientaciones de las principales fachadas de la *Calle de la Rejas de Don Gome* (Sur-15°/ Norte-15° / Oeste-15°). El cálculo se realizó en ausencia de obstrucciones, por lo que los valores obtenidos han de interpretarse como la irradiación máxima que estas superficies podrían recibir (Figura 4.47). Observamos que las irradiancias máximas se reciben en el pavimento (985 W/m²) y en la fachada Oeste (620 W/m²), seguidas de la Sur y Norte con valores más similares (375 W/m² y 240 W/m²).

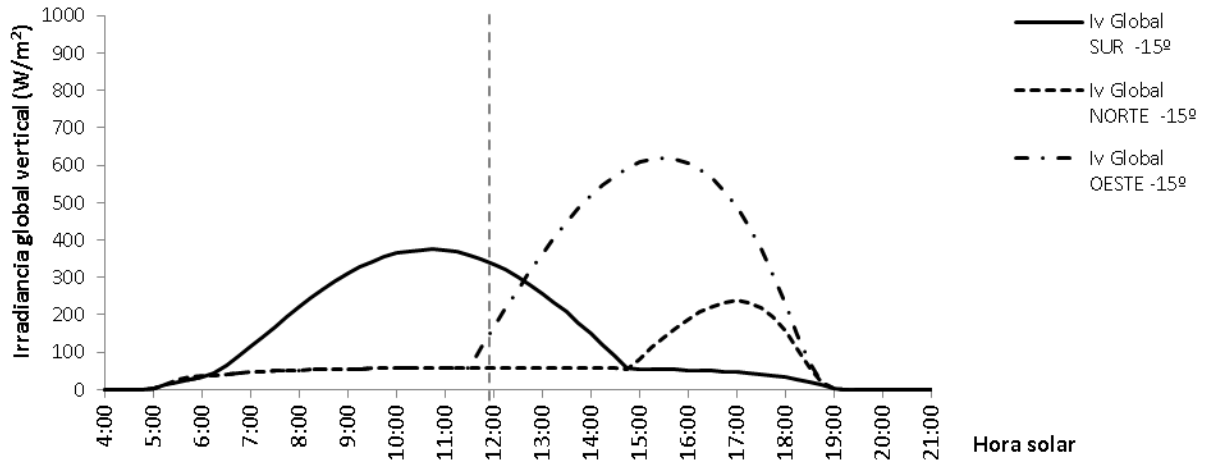


Figura 4. 46. Irradiancia sobre plano vertical a Sur, Norte y Oeste (W/m²) calculada según el modelo de Liu Jordan para cielo despejado (25/07 en Córdoba).

Bajo condiciones de cielo despejado, la radiación acumulada a lo largo del día por las superficies estará muy influenciada por la cantidad de radiación directa recibida, mientras que la aportación del cielo será mucho más limitada (Figura 4.48). Así, la componente solar directa supone más de tres cuartos de la energía acumulada en el pavimento y las fachadas Sur y Oeste. La excepción la constituye la fachada Norte en la que, al estar sombreada durante la mayor parte de la jornada, la radiación difusa del cielo aporta más energía que la directa del sol.

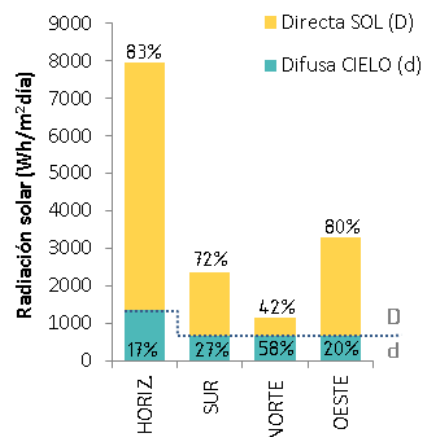


Figura 4. 47. Radiación solar difusa (d) y directa (D) calculada el 25 de julio en Córdoba sobre planos horizontal y vertical sin obstrucción (Sur-15°/ Norte-15° / Oeste-15°).

4.3.3 Procesamiento de los resultados

En este apartado, describiremos cómo el método general de tratamiento de termografías seguido en esta tesis ha sido aplicado al presente caso de estudio.

El procesamiento de los resultados se inició con la **importación de las 34 termografías originales** en la herramienta *FLIR Tools*. A continuación, se calibraron dichas imágenes según las condiciones ambientales durante su toma, como se indica en la Tabla 4.2.

PARÁMETRO	VALOR
Emisividad	1.00
Distancia	0 m
Temperatura atmosférica	Figura 4.43
Humedad relativa	Figura 4.43
Temperatura Reflejada	Indiferente

Tabla 4. 2. Parámetros de calibración de termografías en el Caso de Estudio de la *Calle Rejas de Don Gome*.

Posteriormente, se exportaron las matrices de temperaturas asociadas a las imágenes calibradas en formato *.csv. Dicha información matricial fue tratada en MATLAB, con un doble propósito:

- **Generación de imágenes:**

Por un lado, las matrices de temperaturas fueron coloreadas para producir:

- Secuencia temporal de termografías: Se creó *time-lapse* termográfico con una escala de color unitaria entre 22 y 56°C, que fue fijada para incluir el 90% de los píxeles correspondientes a superficies construidas presentes en la escena.
- Imágenes coloreadas individualmente: Para el estudio de ciertos fenómenos, se generaron termografías con un rango de temperaturas más reducido, adaptado a los valores específicos de la toma.
- Secuencia del diferencial de temperatura superficie-aire: Se generó una secuencia de imágenes sobre el diferencial de las temperatura aparentes superficiales con respecto a la del aire en cada una de las tomas.

- **Generación de gráficos numéricos**

La evolución de las temperaturas de la escena urbana analizada fue estudiada en 6 regiones de interés, coincidiendo con las orientaciones principales de las superficies presentes en la misma (ver Anexo A).

Además, dado que el cañón se compone de grandes superficies con características homogéneas, también se analizaron 9 puntos específicos, que pueden ser representativos de la escena: tres en fachada Sur, 3 en la Norte y 3 en el pavimento (Figura 4.49).

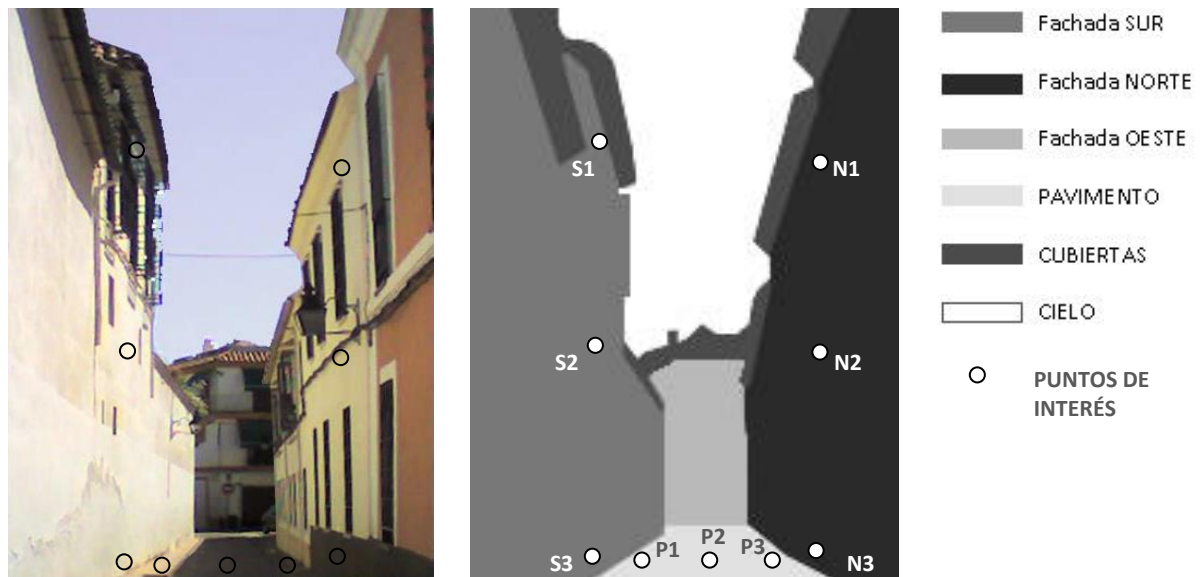


Figura 4. 48. Segmentación en regiones de interés y puntos de estudio de la escena urbana en la *Calle Rejas de Don Gome*.

Características de puntos seleccionados

Los puntos se han caracterizado, materialmente, mediante dos propiedades ópticas superficiales: emisividad y reflectividad³. Y geoméricamente, a través de los factores de vista desde el punto analizado hacia el cielo (SVF), hacia el pavimento (GVF) y hacia las fachadas (BVF).

- **En la fachada Sur** (Tabla 4.3)

Los puntos S1, S2 y S3 se ubican, respectivamente, en la zona alta, media y baja del más alto de los edificios de la fachada Sur. Esta fachada está acabada en una pintura blanca altamente reflectiva ($R > 0.8$), característica de los entornos urbanos mediterráneos. El estado de conservación de la superficie es desigual, por lo que existe una ligera variación de los coeficientes de reflexión entre los puntos ($r_{S1} = 0.85$, $r_{S2} = 0.94$ y $r_{S3} = 0.88$).

- **En la fachada Norte** (Tabla 4.4)

En la fachada Norte se han seleccionado tres puntos de estudio en una misma vertical: N1, N2 y N3. El punto a menor altura, N3, pertenece al zócalo de la casa, de color marrón oscuro, con un coeficiente de reflexión ($r_{N3} = 0.14$). Por su parte, N1 y N2, se ubican a distintas alturas de la fachada acabada con monocapa beige ($r_{N1} = 0.75$; $r_{N2} = 0.75$).

- **En el Pavimento** (Tabla 4.5)

Se estudian tres puntos situados sobre la misma perpendicular a las fachadas: P1, P2 y P3. Los puntos P1 y P3 pertenecen a la acera, formada por piezas de granito ($r_{P1} = r_{P3} = 0.28$), mientras que P2, se ubica en la calzada conformada por adoquines del mismo material tomados con mortero, lo que reduce ligeramente la reflectividad global ($r_{P2} = 0.21$).

³ Los valores de reflectividad fueron determinados experimentalmente, mientras que los de emisividad fueron obtenidos de valores tabulados según el tipo de material en (Minkina & Dudzik 2009).

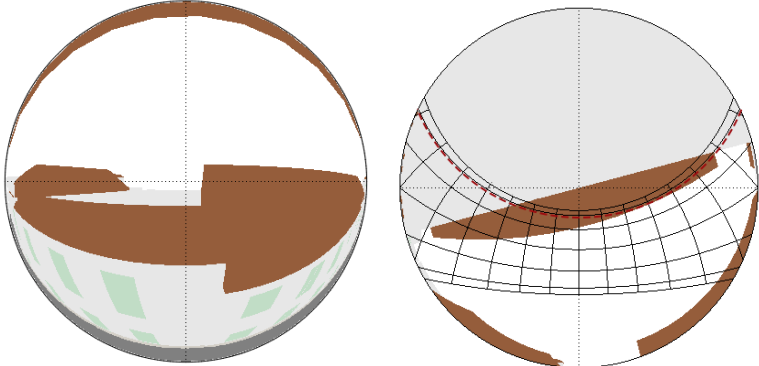
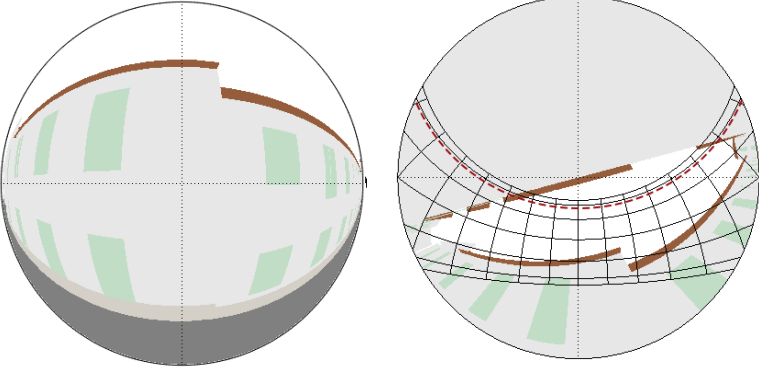
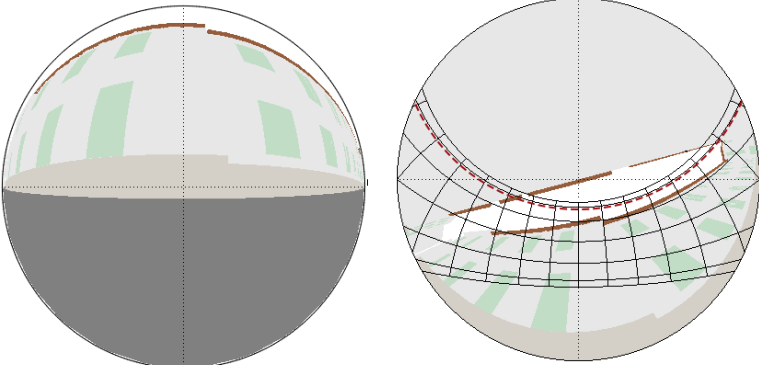
PUNTO [x y]	Propiedades	Factores de Vista	Obstrucción Solar
S1 [48 48]	$\epsilon = 0.95$ $r = 0.90$ $h = 8.65\text{m}$	SVF = 0.42 BVF = 0.54 GVF = 0.04	
S2 [48 120]	$\epsilon = 0.95$ $r = 0.90$ $h = 4.05\text{m}$	SVF = 0.18 BVF = 0.71 GVF = 0.12	
S3 [48 190]	$\epsilon = 0.95$ $r = 0.90$ $h = 0.25\text{m}$	SVF = 0.05 BVF = 0.48 GVF = 0.47	

Tabla 4. 3. Caracterización material y geométrica de los puntos de estudio de la fachada Sur.

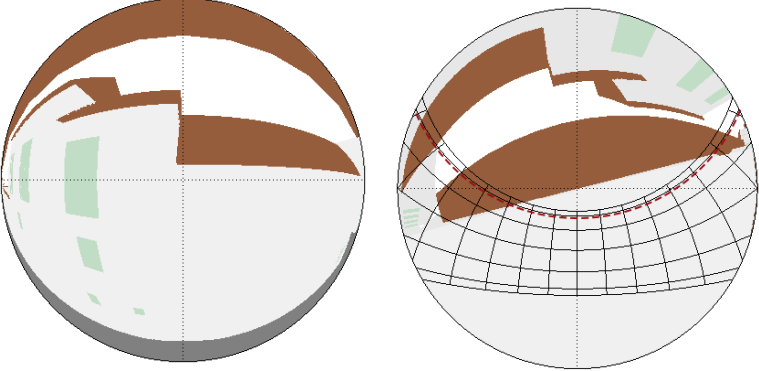
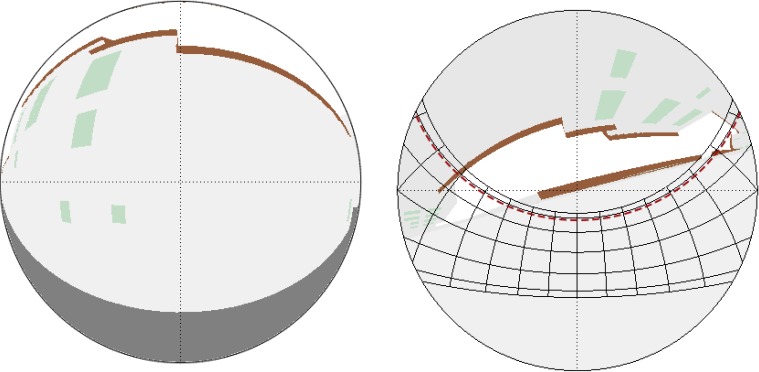
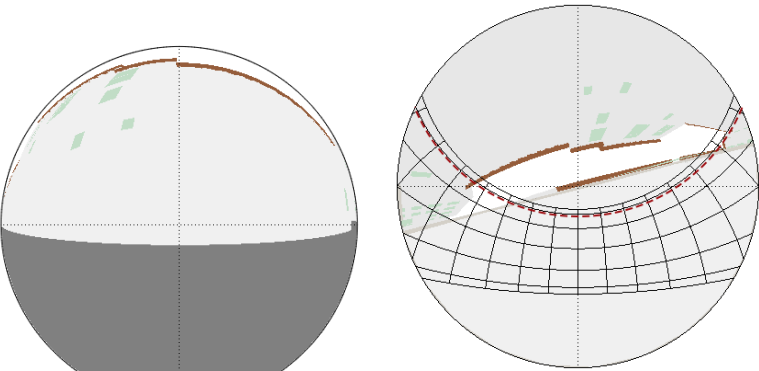
PUNTO [x y]	Propiedades	Factores de Vista	Obstrucción Solar
N1 [122 50]	$\epsilon = 0.94$ $r = 0.75$ $h = 6.60\text{m}$	$SVF = 0.15$ $BVF = 0.79$ $GVF = 0.05$	
N2 [122 120]	$\epsilon = 0.94$ $r = 0.75$ $h = 3.50\text{m}$	$SVF = 0.09$ $BVF = 0.78$ $GVF = 0.13$	
N3 [122 190]	$\epsilon = 0.94$ $r = 0.14$ $h = 0.40\text{m}$	$SVF = 0.03$ $BVF = 0.53$ $GVF = 0.44$	

Tabla 4. 4. Caracterización material y geométrica de los puntos de estudio de la fachada Norte.


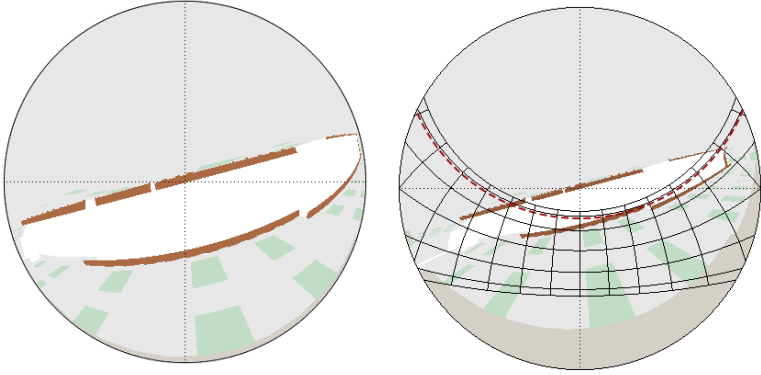

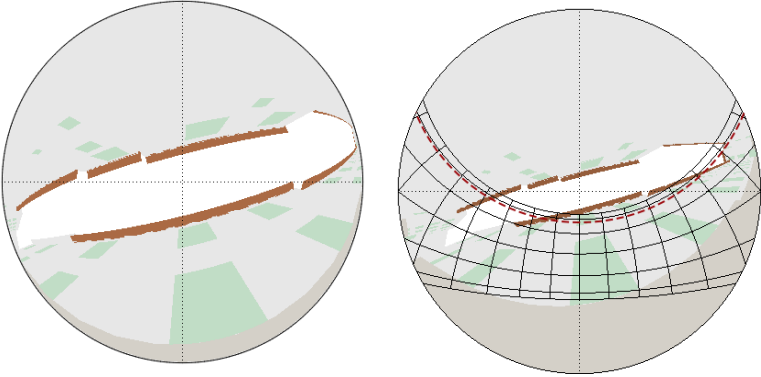

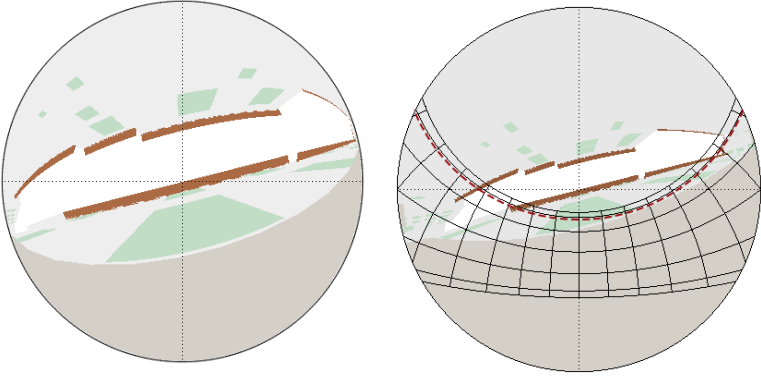
PUNTO [x y]	Propiedades	Factores de Vista	Obstrucción Solar
P1 [63 194] 	$\epsilon = 0.96$ $r = 0.28$ $d = 0.35\text{m}$	SVF = 0.19 BVF = 0.81	
P2 [90 194] 	$\epsilon = 0.96$ $r = 0.21$ $d = 1.80\text{m}$	SVF = 0.18 BVF = 0.82	
P3 [113 194] 	$\epsilon = 0.96$ $r = 0.28$ $d = 3.10\text{m}$	SVF = 0.16 BVF = 0.84	

Tabla 4. 5. Caracterización material y geométrica de los puntos de estudio del pavimento.

4.3.4 Análisis de resultados basado en imágenes

[Secuencia de termografías]

A partir de las fotografías y las termografías calibradas, se creó una secuencia compuesta por 34 imágenes (Anexo A). De ella, se han extraído cinco momentos representativos que permiten explicar la evolución de las temperaturas superficiales a lo largo de la jornada (Figura 4.50).

Justo antes del amanecer, las superficies de la calle alcanzan las temperaturas aparentes más bajas de la jornada, oscilando entre 21°C y 30°C. En estos momentos, las temperaturas más elevadas se concentran en las zonas bajas del cañón urbano (menor visión de cielo). En las fachadas, se observa un gradiente de temperatura que desciende con la altura, con diferencias que superan los 8°C entre el punto más bajo y el más alto. A pesar de que el amplio rango de temperaturas de la escala no favorece la observación de detalles, es posible reconocer los efectos de la inercia en la zona izquierda del pavimento.

Con la salida del sol, las superficies del cañón comienzan a calentarse. En esta época del año, el sol penetra hasta la base del cañón urbano durante gran parte de la jornada, debido a su gran elevación. De hecho, a partir de las 6:30h, los rayos solares ya inciden sobre el pavimento y una hora más tarde bañan de forma rasante la totalidad de la fachada Sur. El Sol continúa su avance hacia el Oeste ganando altura, hasta alcanzar la posición más perpendicular a la fachada Sur entorno a las 10:30h. En este momento, el plano Sur recibe la máxima energía solar pero, debido a la elevada reflectividad del paramento, sólo una pequeña parte de ésta será absorbida, por lo que su temperatura aumenta sólo ligeramente. **La notable radiación reflejada explica que la fachada Norte esté más caliente que la Sur, a pesar de estar en “sombra”.**

En las siguientes horas, el sol continúa su trayecto hasta alinearse con el eje del cañón urbano a las 15:00h. Ahora, los rayos solares son tangentes a las fachadas Norte y Sur, y más perpendiculares a la Oeste. En este momento, se alcanzan las temperaturas más altas de la secuencia (hasta 56°C), localizadas en el pavimento y en la fachada Oeste. Por su parte, las fachadas Norte y Sur, más frías, presentarán comportamientos notablemente simétricos.

Durante las últimas horas de la tarde, el sol ilumina la fachada Norte. Como consecuencia, la temperatura del zócalo se eleva, así como la de las partes más oscuras de la fachada. Finalmente, al caer la noche, las diferencias de temperatura entre superficies vuelven a reducirse, tendiendo a igualarse a las del aire. Se observa, no obstante, que las temperaturas de las superficies que recibieron más radiación durante la jornada, las orientadas a Sur y a Oeste, permanecen ligeramente más altas que el resto, a consecuencia de la inercia térmica.

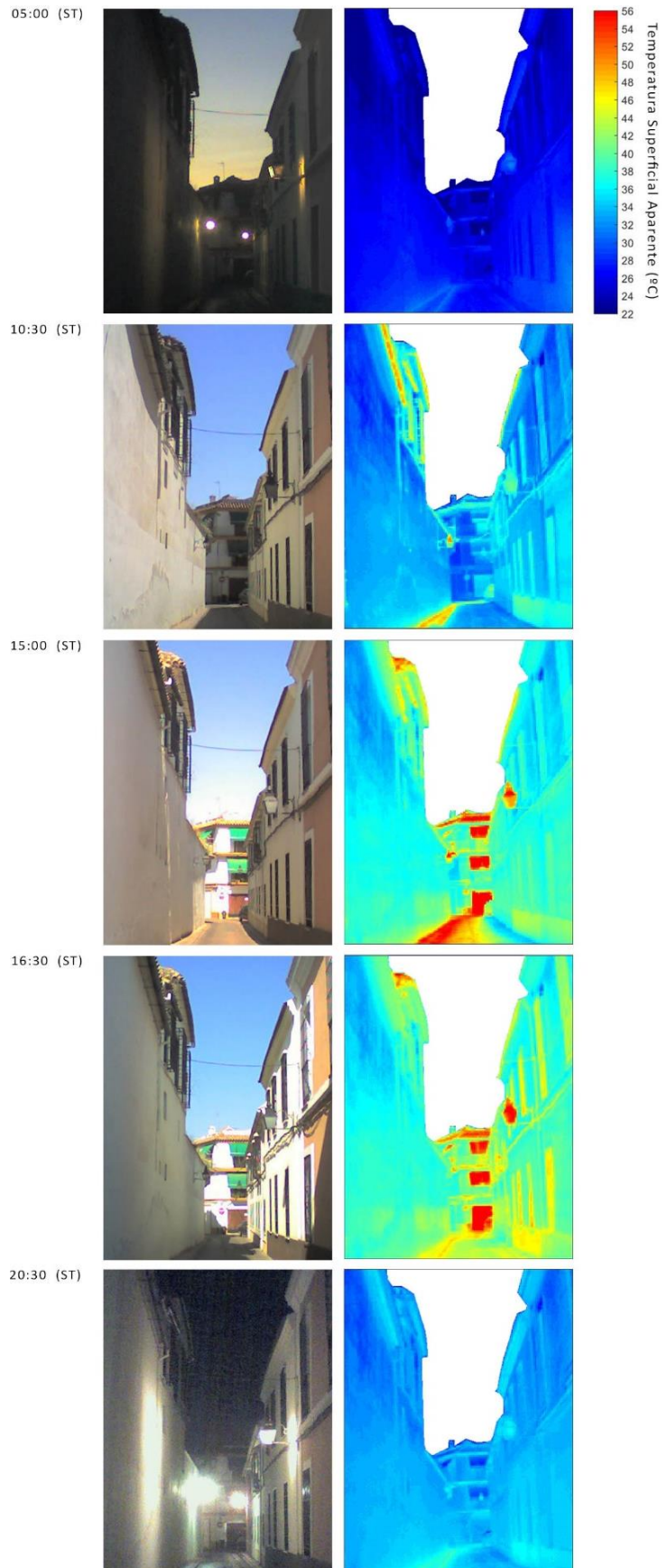


Figura 4. 49. Extracto de la secuencia de imágenes visibles e infrarrojas de la campaña de medición en la *Calle de las Rejas de Don Gome* (25/07/2017).

[Las temperaturas superficiales en fachada Norte-Sur]

En la secuencia de imágenes anterior, se anticipaba que el comportamiento térmico de las fachadas Norte y Sur era similar. Para estudiar este efecto más en detalle, hemos seleccionado dos momentos de la jornada, buscando respectivamente las mínimas y las máximas diferencias de temperatura entre ellas. En la Figura 4.51, se muestran las imágenes visibles e infrarrojas de la escena urbana de estudio a las 04:00 ST. En este momento, las temperaturas de todas las superficies tienden a aproximarse a las del aire, por lo que las diferencias entre las fachadas deberían ser mínimas. En la Figura 4.52, se muestran la fotografía y la termografía tomadas a las 10:30 ST. Este es el momento de la jornada en que la fachada Sur está recibiendo la máxima radiación directa, mientras que la fachada Norte está en sombra, situación en la que las diferencias entre ambas deberían maximizarse. Para poder visualizar más en detalle las posibles variaciones, la escala de color de la termografía ha sido reducida con respecto a la de la secuencia completa, adaptándola al rango de las fachadas. Nótese que aunque los valores absolutos de las escalas de color difieran entre ambas termografías, la diferencia relativa entre sus extremos se ha mantenido para permitir comparaciones.

En los momentos previos al amanecer (Figura 4.51), como era previsible, observamos una notable simetría en la distribución de temperaturas entre las fachadas Sur y Norte. La distribución de temperaturas en las superficies se corresponde en gran medida con la distribución de SVF, demostrando que el enfriamiento en ondas largas hacia el cielo es el fenómeno radiativo dominante en este momento del día. Esta similitud es especialmente significativa en la parte superior e intermedia de las mismas, mientras que en las partes inferiores existen más diferencias. La más llamativa es la zona más caliente de la fachada Sur situada en la parte baja de la pared. Este fenómeno térmico local ocurre, típicamente, en las proximidades de la arista de intersección entre dos planos convexos, donde uno de los planos eleva su temperatura por la visión de otra superficie caliente (en este caso, el pavimento oscuro que se mantiene más caliente por efecto de la inercia y la notable cantidad de radiación que absorbió el día anterior).

Los resultados de la Figura 4. 51 muestran que, en ambientes altamente reflectivos, la distribución de temperaturas en las fachadas enfrentadas es similar, independientemente de si la pared está recibiendo radiación directa o no. De esto se deduce que en este tipo de entornos la orientación es un factor poco influyente térmicamente, creándose un ambiente simétrico. Este es el caso de la fachada Sur y el segundo edificio visible de la fachada Norte, cuyos coeficientes de reflexión son parecidos (exceptuando su zócalo). Esta imagen evidencia que las reflexiones pueden tener consecuencias perceptibles a nivel térmico. Si el paramento que está recibiendo la radiación directa posee una alta reflectividad (fachada Sur), las partes más oscuras de la fachada de enfrente (Norte) pueden presentar temperaturas más elevadas que ésta, a pesar de estar teóricamente “en sombra”. Esta es la causa de las elevadas temperaturas del muro de color naranja y del zócalo oscuro de la fachada Norte. Estos resultados recalcan la importancia de analizar el fenómeno radiativo teniendo en cuenta no sólo el asoleo (efecto de primer orden), sino también las consecuencias combinadas de las reflexiones de radiación y de la materialidad de las superficies (efectos de segundo orden).

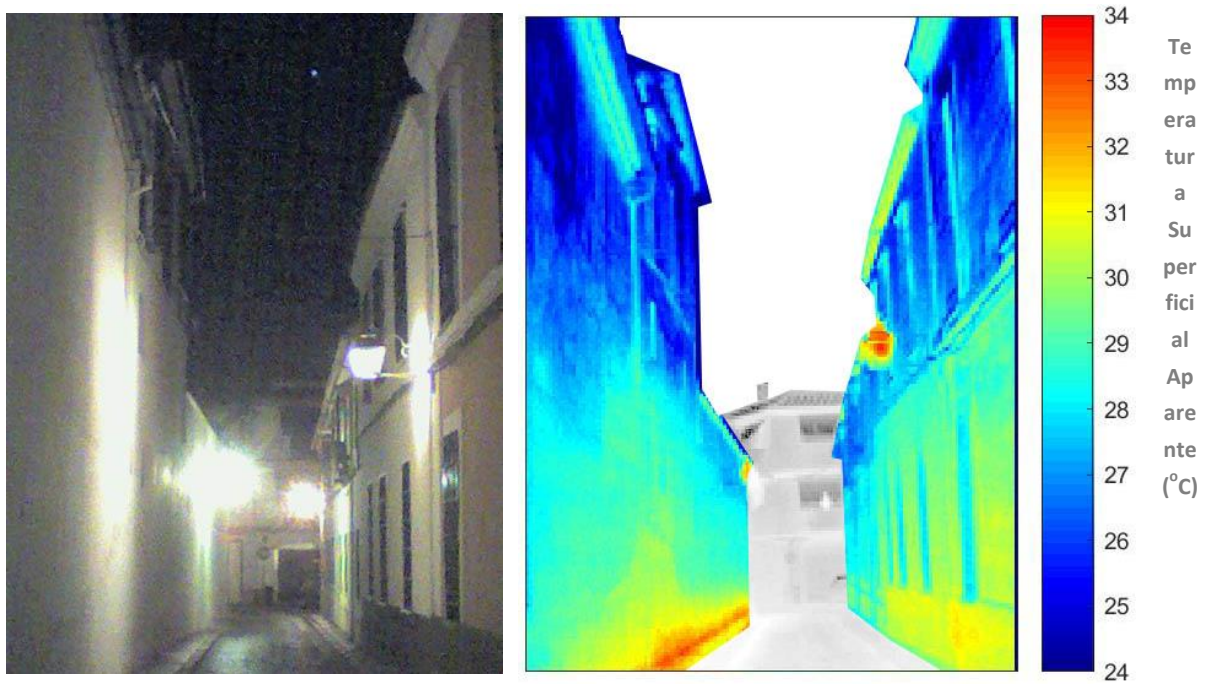


Figura 4. 50. Fotografía y termografía de las fachadas de la *Calle Rejas de Don Gome* a las 04:00 ST (25/07/2017).

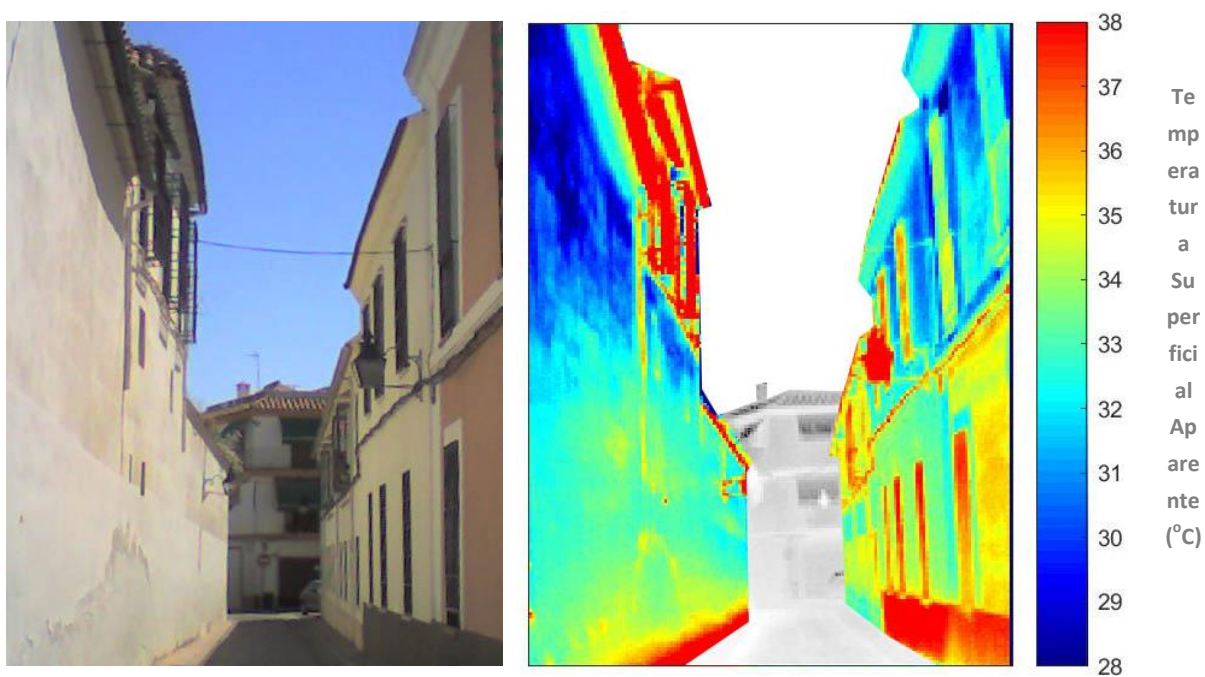


Figura 4. 51. Fotografía y termografía de las fachadas de la *Calle Rejas de Don Gome* a las 10:30 ST (25/07/2017).

Relación entre la temperatura del aire y de las superficies

En la Figura 4.53, la escena urbana de estudio ha sido coloreada en función del diferencial de temperatura entre las superficies y el aire en el momento en que fue tomada la imagen, para cinco momentos de la jornada. Gracias a una doble escala de color, se pueden distinguir las superficies que están más calientes que el aire (tonos rojizos), de aquellas que están más frías que el mismo (tonos azulados).

A la vista de esta secuencia, podemos distinguir dos comportamientos diferenciados en las superficies principales que limitan el cañón. Por un lado, el pavimento, donde se registran temperaturas muy diferenciadas con respecto al aire (hasta aproximadamente 20°C). Por otro, las superficies de fachada del cañón, cuyas diferencias con respecto al aire son más limitadas (hasta aproximadamente 7°C).

En el caso de las fachadas del cañón, encontramos una tendencia que se mantiene a lo largo de toda la jornada: las partes bajas de las mismas están más calientes que el aire, mientras que las partes más altas permanecen más frías que éste. La intensidad del fenómeno y la extensión que ocupan la porción de fachada más caliente y más fría varía, no obstante, a lo largo del día.

Así pues, antes del amanecer es el momento del día en que la zona de fachada más caliente que el aire alcanza su máxima extensión, pero el diferencial de temperatura entre ambos es limitado (de hasta $\approx 3^{\circ}\text{C}$). A lo largo de la jornada, esta zona más cálida que el aire aumenta su diferencia con respecto a éste, pero se reduce en extensión, concentrándose en la zona baja de la fachada, especialmente en el zócalo, que llega a estar $\approx 7^{\circ}\text{C}$ por encima del aire.

Las zonas de fachada que se mantienen más frescas que el aire se localizan en la parte superior de la misma. Sin embargo, existen diferencias en función de la orientación. En primer lugar, se observa que el diferencial de temperaturas con el aire es mayor en la Sur que en la Norte. Además, la extensión de este “paramento fresco” es mayor en la Sur que en la Norte. Y esta relación se mantiene aun cuando la fachada Sur está recibiendo radiación directa y la Norte se encuentra en sombra, como se percibe en las imágenes de las 10.30 ST.

Por lo que respecta al pavimento, observamos que la temperatura de la zona cercana a la fachada Sur se mantiene siempre por encima del aire (independientemente de si recibe o no radiación solar directa), alcanzándose las máximas diferencias algunas horas después del medio día solar (15:00). En cambio, las zonas central y al pie de la fachada Norte están más frescas o más calientes que el aire, según el momento del día. En los momentos en que estas partes reciben radiación solar (ej. 16:30), su temperatura se sitúa notablemente por encima del aire; cuando no, las diferencias se acortan significativamente, y esta área del pavimento está ligeramente por encima o por debajo.

Los resultados muestran que la alta reflectividad de las paredes limita el sobrecalentamiento en fachada con respecto al aire, pero que este efecto crea un atrapamiento radiativo en la base del cañón, donde la mayoría de las superficies mantienen su temperatura por encima del aire.

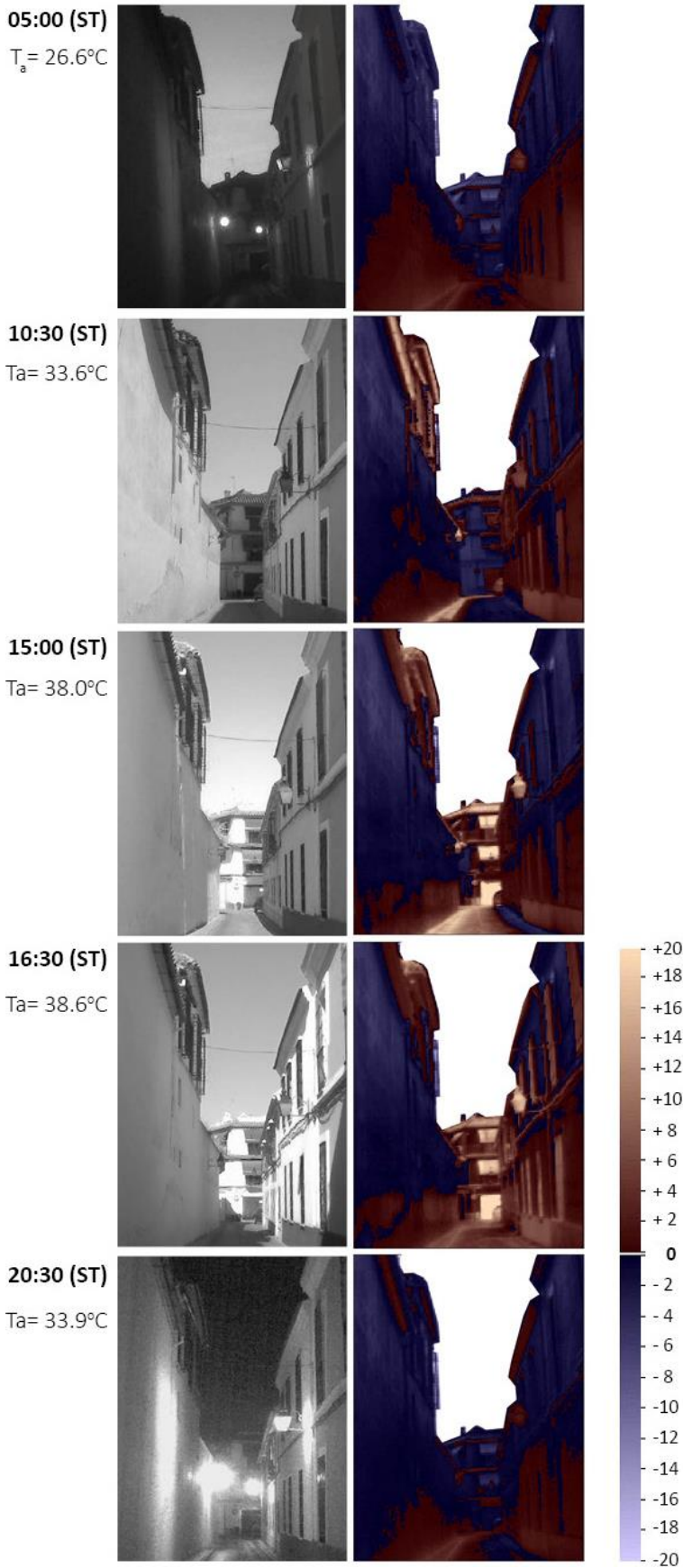


Figura 4. 52. Extracto de la secuencia de imágenes sobre el diferencial de temperatura superficie-aire (Calle de las Rejas de Don Gome, 25/07/17).

4.3.5 Análisis de resultados basado en gráficos numéricos

El análisis numérico se ha centrado en las cuatro áreas de interés que abarcan la mayor parte de la escena urbana analizada: fachada Norte, fachada Sur, el pavimento y el cielo. Las tres primeras se analizarán en base al comportamiento de ciertos puntos representativos, mientras que el análisis de la última partirá del promedio del área de cielo visible.

[Evolución de la temperatura superficial de puntos representativos de las fachadas]

La evolución de las temperaturas superficiales en fachada ha sido analizada en tres puntos representativos de la fachada Norte (Figura 4.54) y en tres puntos de la Sur (Figura 4.55). A modo de referencia, se ha incluido la temperatura del aire y se ha marcado tres momentos representativos a nivel solar: la hora de la salida del sol, el mediodía y la puesta de sol. Como muestran los gráficos, ambas fachadas presentaron comportamientos similares a lo largo de la jornada, aunque las temperaturas en la fachada Norte fueron mayores que la Sur.

En primer lugar, en ambos casos existe una **correlación entre la altura del punto con respecto a la base del cañón urbano y la temperatura superficial** aparente que éste alcanza: cuanto menor es la altura del punto de estudio, mayor será su temperatura. Así, las temperaturas más elevadas se registraron en los puntos situados a menor altura (45.9°C en N3; 41.6°C en S3), mientras que los puntos más altos siempre fueron los más fríos (23.7°C en N1; 21.0°C en S1). Este comportamiento puede explicarse por: i) las diferencias en la visión del cielo entre los puntos y, por tanto, en las posibilidades de enfriamiento radiativo hacia la bóveda celeste; ii) las diferencias en cantidad de suelo visible, superficie con las temperaturas más elevadas del entorno urbano; iii) la mayor velocidad del viento esperable en las partes altas, que puede asociarse a mayores pérdidas convectivas. Fruto de estas diferencias, entre el punto más alto y más bajo de la fachada existió un diferencial que osciló entre 3.3 y 10.5°C en la fachada Norte, y entre 4.8 y 8.5°C en la fachada Sur.

En segundo lugar, **las temperaturas superficiales en ambas fachadas mostraron la misma relación con la temperatura del aire en función de la altura del punto de estudio**. En todo momento, los puntos más elevados estuvieron más fríos que el aire (entre -1.7 y -3.6°C en N1, entre -3.6 y -5.6°C en S1). En cambio, los puntos situados a una altura intermedia presentaron temperaturas muy similares a las éste (diferencia máxima de -1.6°C en N2 y de -2.4°C en S2); finalmente, los puntos ubicados más cerca de la base del cañón urbano estuvieron prácticamente toda la jornada más calientes que el aire (hasta +7.3°C en N3 y +4.1°C en S3).

Finalmente, cabe decir que **el patrón de evolución de las temperaturas superficiales siguió la misma tendencia que el del aire** en todos los puntos, exceptuando el más bajo de la fachada Norte (N3). En él, a partir de las 9:00h, la temperatura aumentó más rápido que en el resto de puntos y que el aire. Además, hacia las 16:30h, se produjo un pico en su temperatura, ausente en el aire y en el resto de puntos. Este comportamiento diferenciado se explica por causas radiativas, ya que la radiación absorbida en N3 es sensiblemente mayor a la absorbida por el resto de puntos.

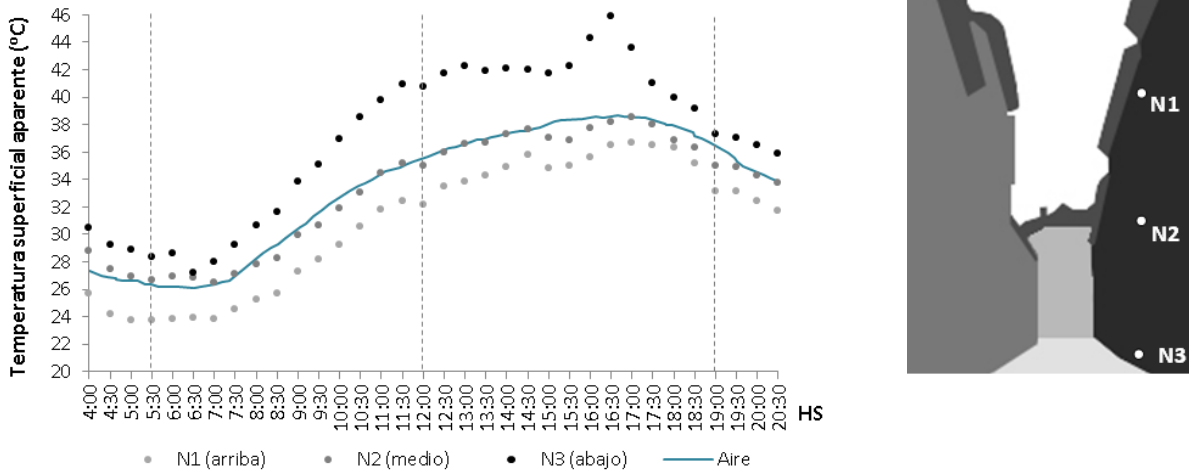


Figura 4. 53. Temperaturas superficiales de los puntos de estudio de la fachada Norte en relación a la temperatura del aire.

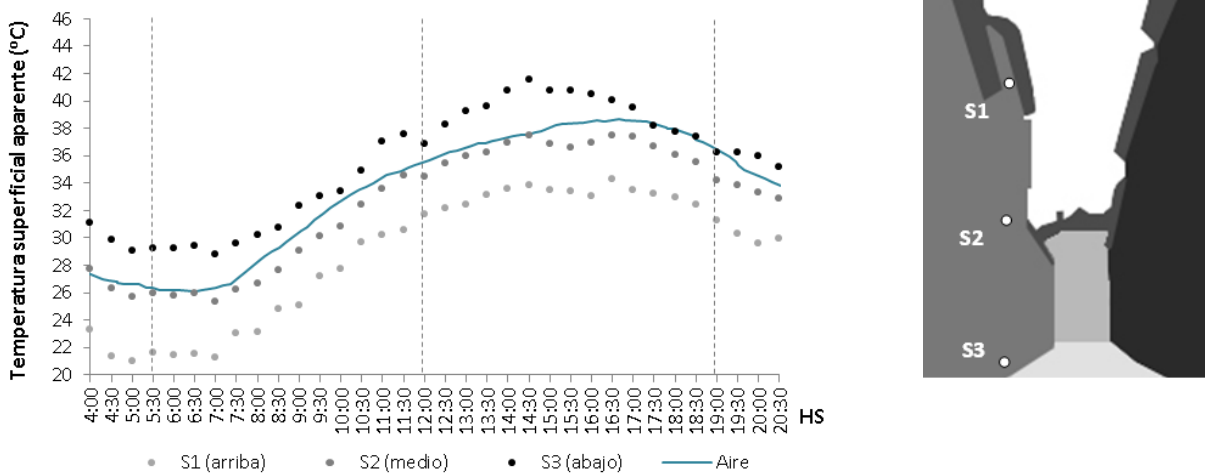


Figura 4. 54. Temperaturas superficiales de los puntos de estudio de la fachada Sur, en relación a la temperatura del aire.

La radiación solar sobre las fachadas y su efecto sobre la temperatura

En un primer análisis, sería esperable encontrar una correspondencia entre la incidencia de radiación solar directa y la temperatura superficial alcanzada. Sin embargo, en este caso las temperaturas de la fachada Norte son más elevadas que las de la Sur, a pesar de que la primera superficie recibe menor cantidad de radiación solar directa que la segunda.

Para analizar las causas de este comportamiento, se llevó a cabo **una simulación detallada de la radiación solar incidente** sobre los puntos de estudio en el software RADIANCE (RADIANCE Community 2004; Ward Larson & Shakespeare 1998), empleando el método *Daylight Coefficient* (Bourgeois et al. 2008) con 7057 *patches* de cielo y un paso de tiempo de 5 minutos. Las simulaciones fueron llevadas a cabo sobre el modelo 3D descrito en el apartado 4.3.1, a partir de los datos de radiación de entrada expuestos en el apartado 4.3.2.

Los resultados de radiación obtenidos de la simulación incluyen las componentes directa del sol, difusa del cielo y reflejada del entorno construido circundante. En la Figura 4.56, se muestra la radiación solar que incide durante el día de estudio sobre los puntos estudiados de las fachadas, distinguiendo la energía aportada por cada componente. En el gráfico se ha incluido la radiación que recibiría la misma superficie sin ninguna obstrucción, a modo de referencia, para valorar el efecto de la morfología.

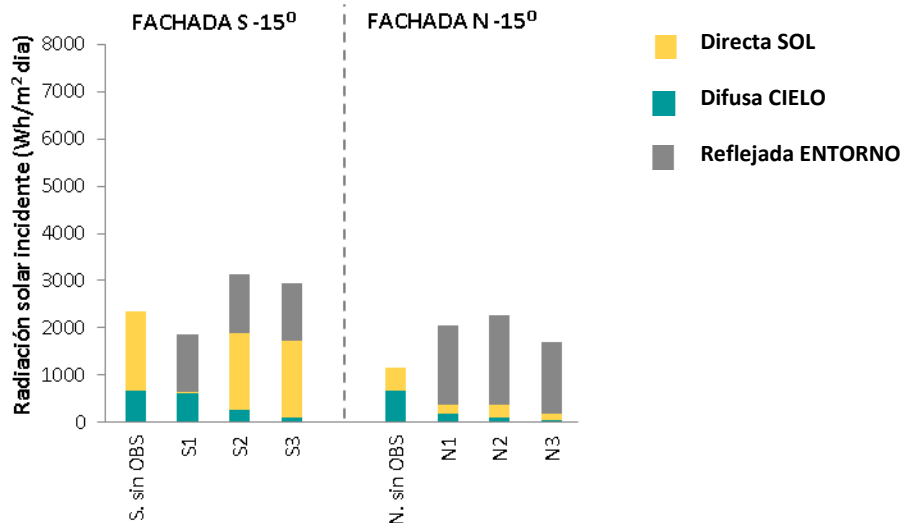


Figura 4. 55. Radiación solar incidente simulada sobre los puntos de estudio de la fachada Sur y la Norte y en el mismo plano sin obstrucción durante el 25 de julio (Wh/m² día).

Los resultados muestran que, debido a las obstrucciones urbanas, disminuye la radiación que reciben los puntos analizados proveniente directamente del sol (sombras del entorno) y del cielo (menor visión del cielo). La disminución de la componente directa es más notable en el punto más alto de la fachada Sur (S1), afectado por la sombra de la cubierta. La reducción de la aportación difusa del cielo estará ligada a la disminución en la visión de bóveda. La mayoría de los puntos ven menos de un 19% de cielo, lo que reduce notablemente la radiación proveniente del cielo (a excepción de S1, con 42%).

Las simulaciones muestran que, a pesar de la obstrucción del entorno, la radiación recibida por la fachada en el interior de un cañón puede ser mayor que en un contexto aislado, debido a la contribución de la energía reflejada (esto es así en todos los puntos analizados, excepto en S1, a la sombra de la cornisa). La proximidad entre los planos verticales, y su alta reflectividad, propicia que las inter-reflexiones se multipliquen dentro del cañón urbano. En la fachada Norte, estas reflexiones aportan más del 80% de la energía recibida. En la fachada Sur, el peso relativo de las reflexiones es menor, aunque su aportación sigue siendo significativa en términos absolutos.

En definitiva, en este entorno, la mayor parte de radiación recibida proviene del sol o del entorno, mientras que la contribución del cielo es minoritaria. En los puntos de la fachada Sur no afectados por el alero (S2 y S3), la radiación solar directa representa la principal contribución. Mientras que, en el resto y, sobre todo en la fachada Norte, las reflexiones aportan la mayor parte de la energía solar.

Los resultados recalcan la importancia de aspectos relacionados con el nivel de detalle del modelo. Por un lado, el efecto de la sombra de elementos no presentes en modelos urbanos simplificados, como aleros. Por otro la materialidad de las superficies que, en este caso, convierte al entorno en una nueva fuente de radiación cuyo aporte excede en muchos casos las pérdidas de energía derivadas de una menor visión del cielo y, sobre todo, del sol.

Hasta este punto, se ha mostrado la energía total que llega a los puntos de estudio durante toda la jornada. Sin embargo, de cara a estudiar la evolución de las temperaturas superficiales, también resulta interesante analizar cómo se distribuye dicha energía a lo largo del día y, sobre todo, qué parte de ella es absorbida. En la Figura 4.57, se contraponen el flujo solar incidente al absorbido por la superficie en cada momento.

Observamos que, a pesar de que el flujo solar incidente en los puntos de la fachada Sur es mayor al de la Norte durante gran parte de la jornada, la energía absorbida por estos últimos es mayor (de 77 W/m² en la Norte a 50W/m² en Sur), debido a las diferencias de reflectividad entre fachadas (más altas en la Sur que en la Norte). El punto con un comportamiento más extremo es N3, situado en un zócalo oscuro (r =14%), siendo el que mayor radiación absorbe, (≈200 W/m²), con máximos debidos tanto a la componente reflejada (10:30h) como a la directa (16:00h).

De las anteriores observaciones, se concluye que el comportamiento de las temperaturas superficiales revelado por las termografías no es explicable en términos de radiación incidente, sino que hay que basarse en la porción de radiación absorbida.

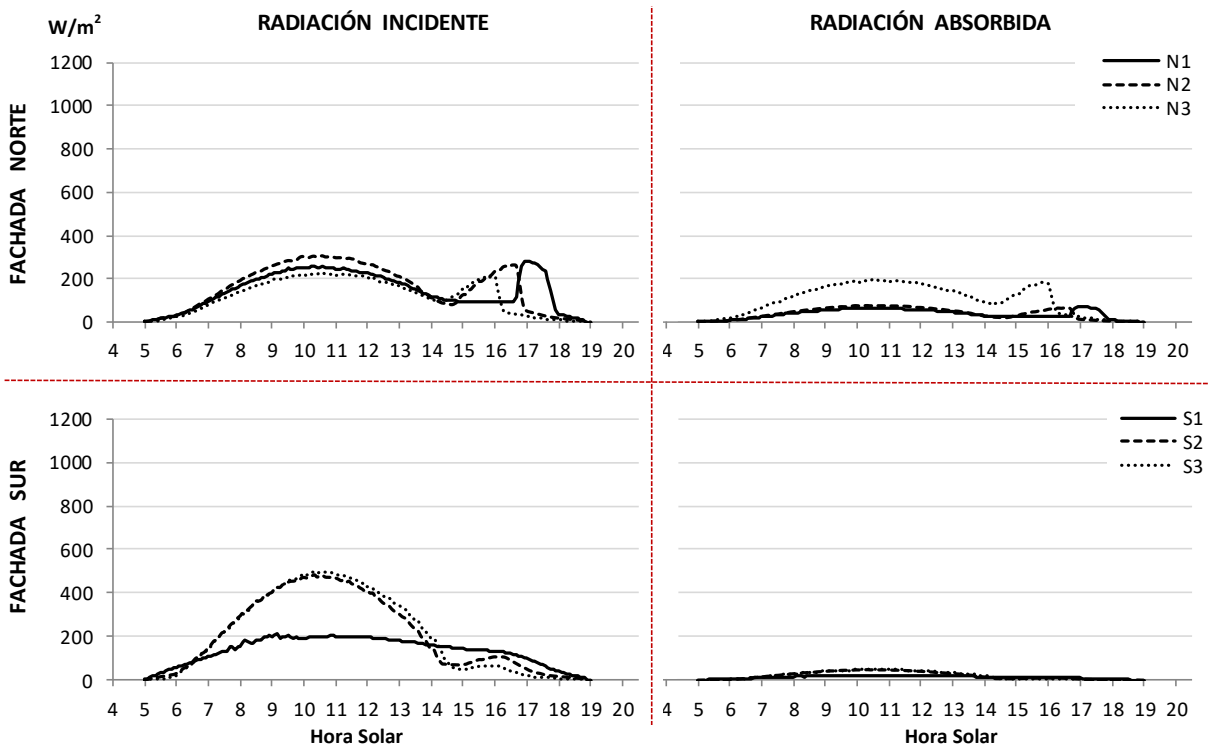


Figura 4. 56. Radiación global incidente y absorbida (W/m²) en los puntos de estudio de las fachadas Norte y Sur. (Radiación absorbida calculada multiplicando la radiación incidente simulada por el coef. de absorción α de cada punto, (α = 1 – r).

Para discutir más en detalle la relación entre temperaturas superficiales y radiación absorbida, hemos seleccionado los puntos con menor altura de las fachadas Norte y Sur: N3 y S3 (Figura 4.58). Durante la mayor parte de la jornada, las temperaturas en la fachada Norte son más elevadas que en la Sur, con diferencias que llegan a ser de hasta 5.8°C.

En ambos puntos, los intercambios por convección con el aire y por radiación hacia el cielo son similares (aproximadamente la misma altura, por tanto, velocidad de viento parecida; similar SVF, por tanto, enfriamiento radiativo en ondas largas hacia el cielo parecido). Por ello, las diferencias de temperatura han de deberse principalmente a las diferencias en la cantidad de energía absorbida, que es mayor en N3, lo que recalca la importancia del acabado superficial.

Además, en este gráfico se han correlacionado los momentos de máxima radiación con las máximas en la temperatura superficial, revelando un retraso de entre 45 min y 1 hora.

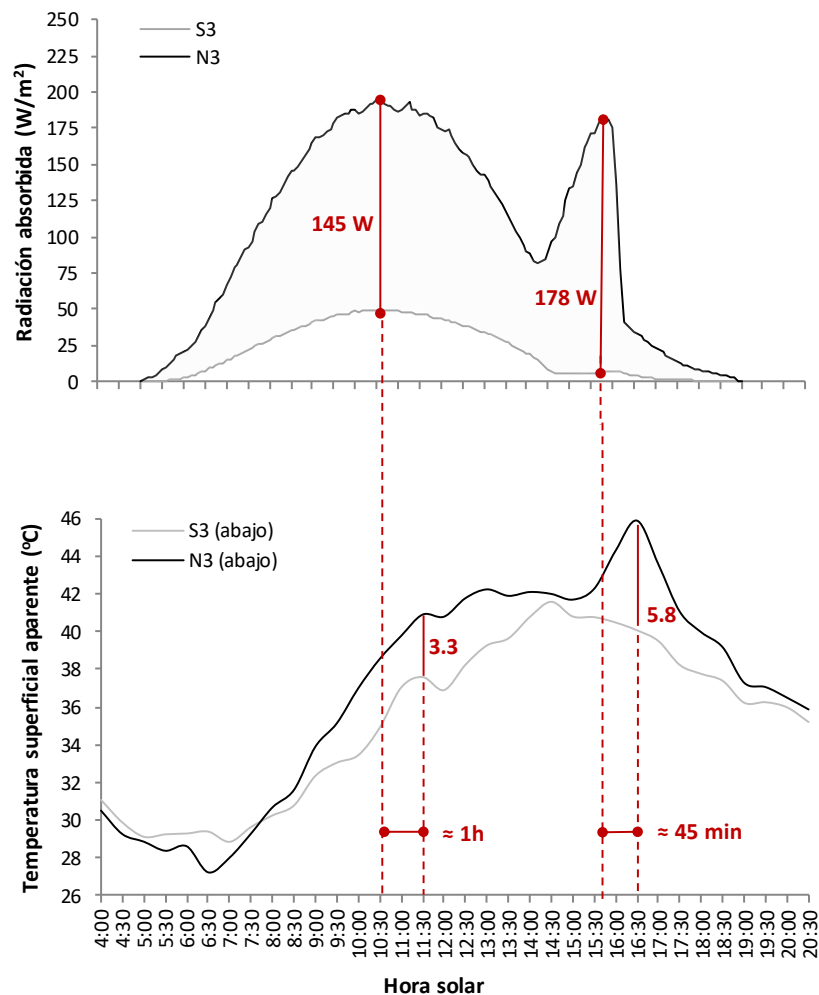


Figura 4. 57. Radiación absorbida comparada y temperatura superficial en los puntos de estudio a menor altura de la fachada Sur (S3) y de la Norte (N3).

Las posibilidades de enfriamiento radiativo y las temperaturas superficiales en fachada

En entornos compactos, se produce un descenso brusco del SVF entre la parte superior e inferior de la fachada, lo que se traduce en enfriamientos radiativos hacia el cielo diferenciados. Para valorar sus consecuencias, se han estudiado las temperaturas superficiales en fachada antes del amanecer, ya que en este momento el enfriamiento hacia el cielo es el fenómeno radiativo dominante.

En la Figura 4.59, se correlaciona el SVF de los puntos de estudio en las fachadas Norte y Sur, con su temperatura superficial a las 04:00 ST. Como se preveía, cuanto mayor es la visión del cielo desde un determinado punto, menores son las temperaturas que en él se registran, siendo no lineal la relación entre ambos parámetros. Así, la misma variación de SVF se asocia a cambios más significativos de temperatura en puntos con poca visión de cielo, que en aquellos con mayor visión del cielo. Esto implica que en entornos compactos compuestos por edificios de varias alturas habrá más diferencias entre las plantas inferiores que entre las plantas superiores.

Se observa además que, en ausencia de radiación solar, las diferencias en la cantidad de cielo visible provocan variaciones más importantes en las temperaturas superficiales que un cambio de orientación de la fachada. Así, para un mismo valor de SVF, la diferencia de temperatura entre la fachada Norte y Sur es aproximadamente de 1°C (línea azul). Mientras que, dentro de una misma orientación, los cambios de SVF se asocian con variaciones en la temperatura de 4.8°C en la fachada Norte y 7.7°C en la Sur (línea roja). Este gráfico evidencia que pequeñas variaciones en la cantidad de cielo visible – es decir, ligeras variaciones geométricas – afectan a la temperatura de las superficies de manera perceptible (a modo de referencia, un cambio de 0.5 en el SVF, de 0.37 a 0.42, hace variar la temperatura superficial más de 1°C, efecto similar al cambio de orientación).

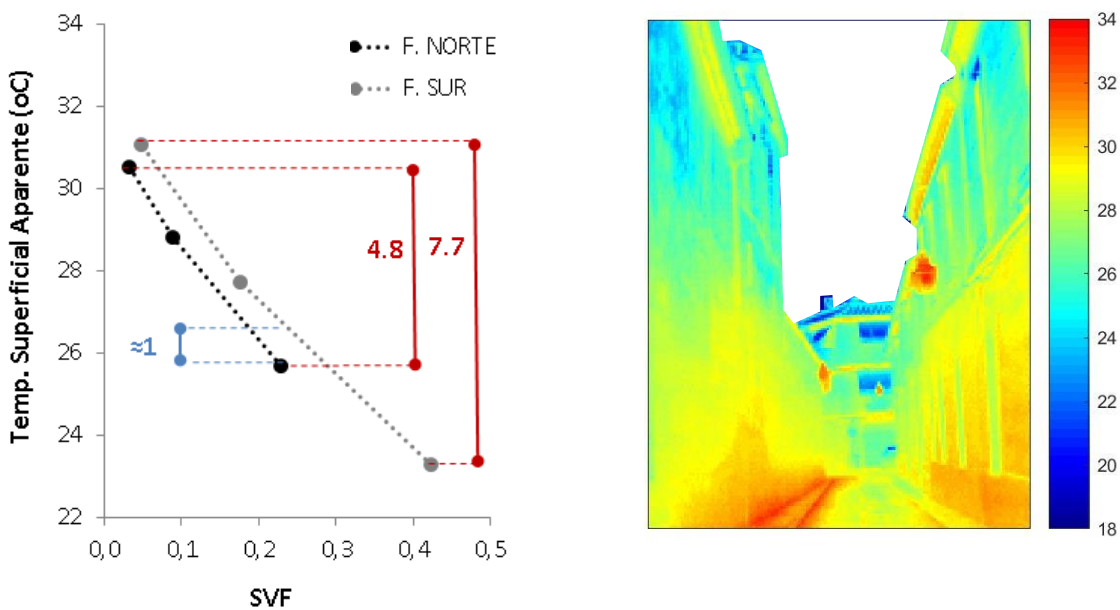


Figura 4. 58. Temperatura Superficial en función del SVF en los puntos de estudio de las fachadas Norte-Sur a las 04:00 ST.

[Evolución de la temperatura superficial de puntos representativos del pavimento]

La evolución de la temperatura superficial de los puntos estudiados en el pavimento P1, P2 y P3 en relación a la temperatura del aire se representa en la Figura 4.60. Los datos muestran que en el pavimento se registraron las temperaturas más altas de la escena, oscilando entre 26.1°C (registrados a las 7:00 en P3) y 55.9°C (alcanzados a las 14:30 en el punto P1).

En ausencia de radiación solar, las temperaturas superficiales en los tres puntos fueron similares entre sí, con una diferencia entre ellos inferior a 4°C. Observamos que, antes del amanecer, los puntos más cercanos a las fachadas (P1 y P3) se encuentran más calientes que el punto central. Este comportamiento puede asociarse con su menor visión de cielo y un cierto efecto de atrapamiento radiativo entre geometrías convexas.

Con el avance del día, la temperatura de ciertos puntos se incrementa, y con ello las diferencias térmicas entre ellos. Este marcado aumento de temperatura tiene lugar a distintas horas, según el punto. Como consecuencia, en la gráfica se observa un escalonamiento entre los máximos de las distintas curvas de temperatura. Así, en el punto más cercano a la fachada Sur (P1) se alcanzaron 55.9°C a las 14:30; una hora más tarde en el punto central de la calle se llega a 47.0°C (P2) y, una hora después a 43.7°C en el punto más próximo a la fachada Norte (P3).

En cuanto a la relación entre temperatura superficial y del aire, observamos dos comportamientos diferenciados. El primero lo identificamos cuando las superficies están en sombra. En este momento, su temperatura evoluciona en paralelo a la del aire, con ligeras diferencias respecto a éste (inferiores a 5°C). El segundo comportamiento tiene lugar cuando el sol incide sobre las superficies y éstas se calientan sensiblemente por encima del aire (+18.6°C en P1, +8.5°C en P2 +5.1°C en P3).

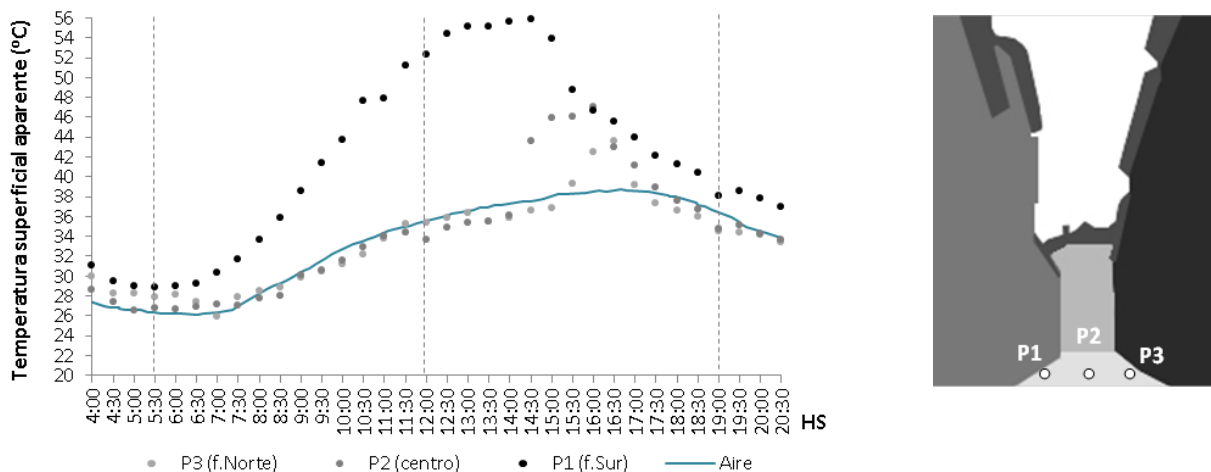


Figura 4. 59. Temperaturas superficiales de los puntos de estudio del pavimento en relación a la temperatura del aire.

La radiación solar sobre el pavimento y su efecto sobre la temperatura

Para explicar el comportamiento térmico de los puntos de estudio del pavimento, se realizó una simulación de la radiación incidente, análoga a la llevada a cabo sobre las fachadas, considerando las componentes directa, difusa y reflejada.

La distribución de la energía incidente y absorbida a lo largo del día se muestra en la Figuras 4.61. El total acumulado al final de la jornada, segregado según la componente de origen, se representa en la Figura 4.62.

En primer lugar, cabe destacar que tanto el flujo solar como el total de radiación recibida por el pavimento son mucho mayores que los incidentes sobre las fachadas Norte y Sur, con un flujo solar que alcanza los 1144 W/m^2 en P1 a las 12:00h. El efecto de las sombras del entorno es claramente legible en los gráficos de radiación del pavimento, asociándose con bruscos descensos. Así, por ejemplo, se observa que el punto más cercano a la fachada Sur (P1) está al sol desde el amanecer hasta las 14:30h, mientras que el punto situado en mitad de la calle (P2) y el ubicado junto a la fachada Norte (P3) comienzan a recibir radiación directa durante la tarde.

Dada la baja reflectividad del pavimento (entre 21 y 28%), gran parte de la radiación incidente es absorbida por la superficie. Como consecuencia, se registran flujos de radiación absorbida de hasta 823 , 713 y 492 W/m^2 en los puntos P1, P2 y P3 respectivamente, que concuerdan con las elevadas temperaturas registradas en el pavimento.

Los máximos del flujo solar incidente/absorbida muestran una correspondencia con el escalonamiento en los máximos de temperatura, aunque con un retraso temporal. Dicho desfase se puede estimar en casi dos horas, más del doble del encontrado en el caso de las paredes, lo que indica la mayor inercia del pavimento en comparación con los muros.

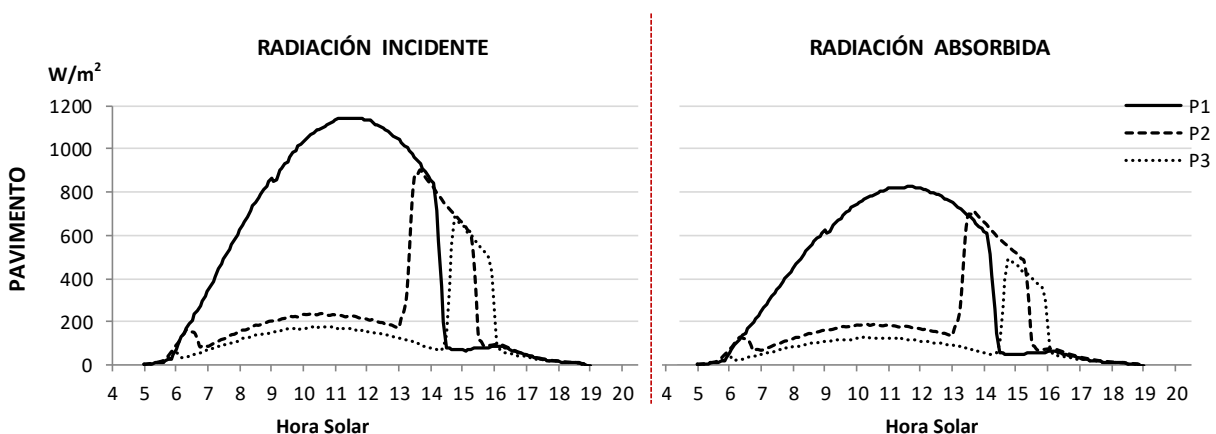


Figura 4. 60. Flujo solar total incidente y absorbido (W/m^2) en los puntos de estudio del pavimento.

Observando la energía acumulada a lo largo de la jornada, vemos que la mayor parte proviene de la componente directa o de la reflejada, mientras que la contribución del cielo es minoritaria.

Dada la gran elevación del sol en esta época del año, todos los puntos estudiados reciben radiación solar directa, a pesar de la gran oclusión del entorno, y ésta representa una importante parte del total de energía que incide sobre el punto. El punto P1 fue el que más radiación recibió y absorbió durante la jornada, y también donde se registraron las temperaturas más altas. Este efecto se mantuvo incluso en ausencia de radiación solar, mostrando el efecto combinado de la inercia y la absorción de energía.

Un aspecto llamativo de los resultados es la magnitud de las reflexiones provenientes del entorno en relación al total acumulado. Este aporte compensa parcialmente la pérdida de energía derivada de las obstrucciones urbanas (disminución de las componentes directa del sol y difusa del cielo). Sin embargo, a diferencia del caso de las fachadas, la radiación incidente en el pavimento es menor en el interior del cañón que en una situación en la que no existan obstrucciones urbanas, incluso dentro de un entorno altamente reflectivo como el analizado.

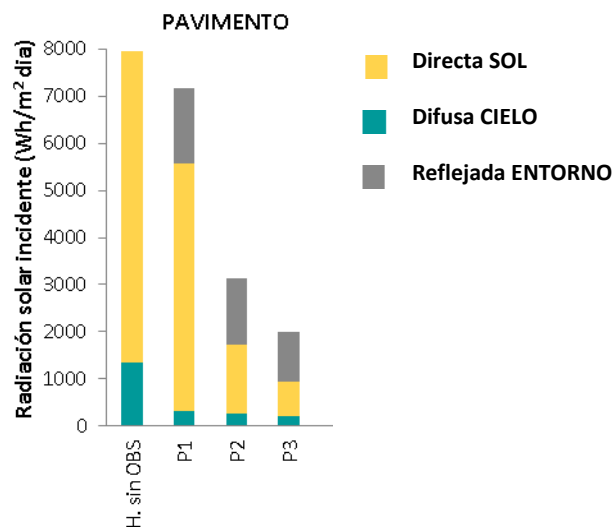


Figura 4. 61. Radiación solar incidente simulada sobre los puntos de estudio del pavimento y en el mismo plano sin obstrucción durante el 25 de julio (Wh/m² día).

[Análisis de la distribución de temperaturas del cielo]

En este apartado, analizamos las temperaturas aparentes de la parte de bóveda celeste visible en la escena urbana estudiada. Para ello, se analiza la región correspondiente al cielo en la secuencia de las termografías, extrayendo para cada toma los valores promedio y el rango corregido de temperaturas de la misma (Figura 4.63).

Los resultados muestran una cierta correlación entre la evolución de la temperatura de la parte de cielo estudiada y la del aire. El perfil de ambas a lo largo de la jornada fue similar, aunque las temperaturas del cielo fueron siempre mucho menores que las del aire. En nuestra escena, la parte de cielo visible estuvo en promedio entre 22 y 35°C más fría que el aire, oscilando entre -7°C y +23°C, con un rango instantáneo de temperaturas de entre 17 y 21°C.

Es importante recalcar que los anteriores valores de temperatura se corresponden con ángulos de elevación comprendidos entre los 8 y los 22°. En cambio, de los ángulos más cercanos al horizonte (obstruidos por las edificaciones) y de los más próximos al cenit (fuera de encuadre), no se dispone de datos reales medidos. Las temperaturas mostradas en las termografías son, por tanto, representativas únicamente de una cierta zona de la bóveda celeste que realmente “ven” las superficies urbanas. En este sentido, se trata de una información que no es directamente “utilizable” para evaluar los intercambios radiativos cielo-superficies construidas (Nahon; et al. 2016), pero que puede ser de utilidad para estimar las temperaturas del resto de la bóveda.

Para realizar una primera aproximación de la distribución de temperaturas sobre la totalidad de la bóveda, nos basaremos en el perfil de temperaturas obtenido bajo cielo despejado por Kruczek (2015). Se ha partido de la hipótesis de que el gradiente relativo entre cenit y horizonte es el mismo en ambos casos, aunque las temperaturas absolutas varíen.

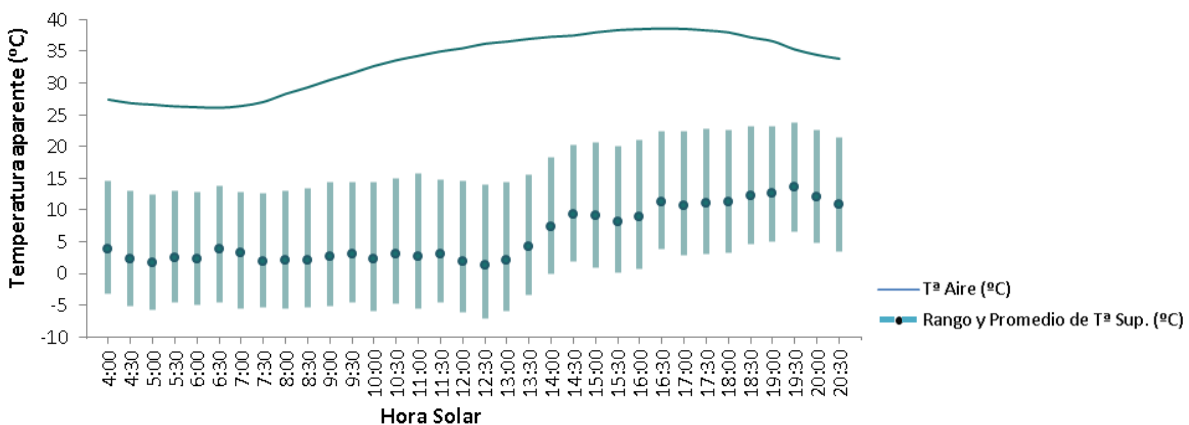


Figura 4. 62. Temperatura superficial aparente promedio y rango de la parte de cielo visible en la escena termografiada en relación a las del aire.

Según las mediciones de Kruczek (2015), el cielo está 55°C más caliente en el horizonte que en el cenit, el punto más frío de la bóveda (a una temperatura T_z). Entre ambos puntos existe un gradiente que varía de forma desigual con la elevación, siendo más acusado cuanto más cerca del horizonte. Sus resultados muestran que la temperatura del cielo apenas varían en la zona del cielo comprendida entre el cenit y los 45° de elevación ($<5^{\circ}\text{C}$). Mientras que, entre este punto y el horizonte, la temperatura aumenta de manera muy notable ($\approx 50^{\circ}\text{C}$).

La aproximación que aquí se propone consiste en desplazar la curva de temperaturas del cielo obtenida por Kruczek (2015) hasta ajustarla con la temperatura del cielo observada en nuestras termografías a una elevación de 15° (ángulo que se corresponde con la elevación intermedia de las que aparecen en la escena termografiada). En la Figura 4.64, se muestran los resultados obtenidos por este procedimiento para las 5:00h HS del día de medición. En este ejemplo, se observa que la temperatura del cielo oscilaría entre los -29°C del cenit y los 26°C del horizonte, valores aparentemente razonables. Nótese además que la temperatura en el horizonte (elevación de 0°) es muy cercana a la del aire, tal como era de esperar según las referencias⁴.

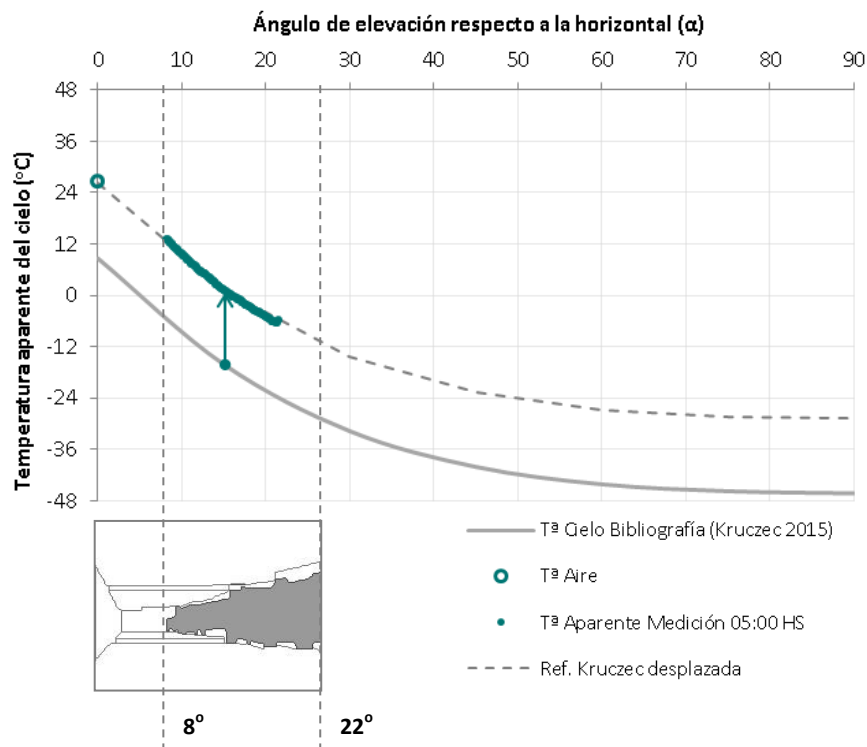


Figura 4. 63. Estimación de temperaturas del cielo en función del ángulo de elevación con respecto al horizonte a las 05:00 en *Calle de las Rejas de Gome* (azul) tomando como base la referencia bibliográfica de Kruczek 2015 (gris).

⁴ Esta misma aproximación se repitió en diversos momentos de la jornada. En ausencia de radiación solar, se detectó un comportamiento muy similar al descrito para las 5:00h. Sin embargo, durante las horas del día, la temperatura del aire estaba por encima de la temperatura estimada del cielo en el horizonte. Este hecho es explicable, ya que el modelo Kruczek (2015) se basó en observaciones realizadas durante la noche.

La importancia de la temperatura del cielo visible desde un punto

Para cuantificar los intercambios radiativos entre una superficie y el cielo, es necesario conocer, en primer lugar, qué cantidad de bóveda celeste ve una determinada superficie, es decir, su factor de vista de cielo. Sin embargo, dado que las temperaturas se distribuyen de forma anisótropa sobre la bóveda celeste, también será importante conocer qué parte del mismo está viendo dicho punto. En el siguiente gráfico, se da un ejemplo de la importancia que puede tener este aspecto (Figura .65).

En la parte izquierda de la imagen, se representa sobre la bóveda celeste el perfil de temperaturas del cielo observado durante una noche despejada por Kruczek (2015). Esta semi-esfera ha sido proyectada ortogonalmente sobre el plano vertical (arriba) y horizontal (abajo) para obtener, respectivamente, la visión del cielo desde una fachada y el pavimento sin obstrucciones. Las fachadas “ven” de manera más frontal la zona más cercana al horizonte, por lo que están más expuestas a las zonas más calientes del cielo. En el caso del pavimento, ocurre a la inversa. Esta realidad, junto con el hecho de que el pavimento puede ver la totalidad de la bóveda celeste y una fachada sólo un 50%, explica que el potencial de enfriamiento radiativo de un plano horizontal sea sensiblemente mayor que el de uno vertical en un contexto sin obstrucciones.

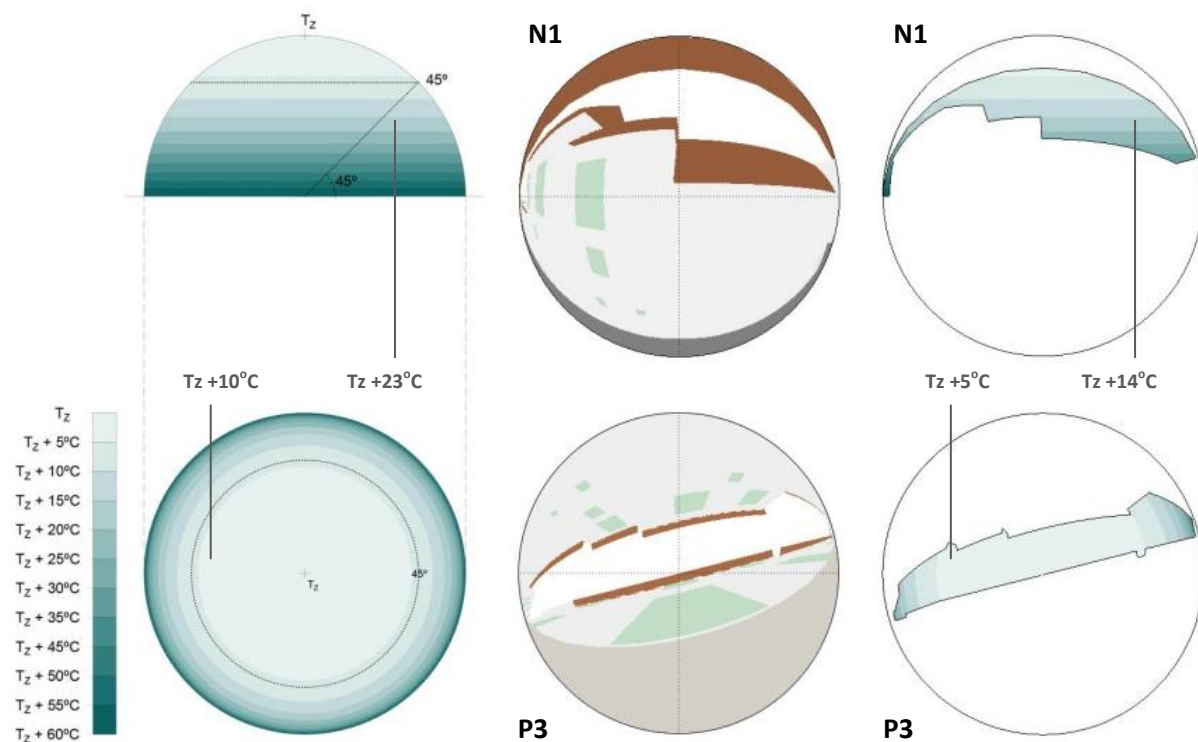


Figura 4. 64. Gradiente de temperatura del cielo en relación a la temperatura del cenit en situación sin obstrucciones y en el caso de un punto de fachada (N1) y de un punto del pavimento (P3).

En un contexto urbano, sin embargo, la visión del cielo queda parcialmente obstruida por su entorno. En la parte izquierda y centro, se ilustran dos situaciones típicas: un punto sobre una fachada y un punto sobre el pavimento (en nuestro caso, el punto más alto de la fachada Norte, N1, y el más cercano a dicha pared sobre el pavimento, P3). Aunque ambos puntos ven una cantidad de cielo similar (SVF en P3=16%; SVF en N3=15%), la temperatura a la que está la parte de bóveda celeste que cada uno “ve” es diferente, tal como se muestra en la parte derecha de la imagen. En el caso del punto del pavimento (P3), la parte de cielo visible corresponde, en gran parte, con la parte más fría del cielo (entre el cenit y los 45° de elevación). En cambio, la porción de cielo vista por el punto situado en la fachada (N3) se encuentra mayoritariamente entre 15° y 50° de elevación, quedando obstruidas la zona del cenit y del horizonte por la cubierta y los vecinos, respectivamente. Como consecuencia, la temperatura promedio del cielo en el punto P3 será aproximadamente 5°C superior a la del cenit ($T_z+5^\circ\text{C}$), mientras que en N3 será de 14°C más ($T_z+14^\circ\text{C}$).

La posibilidad de enfriamiento radiativo en entornos compactos y el balance radiativo global en fachada⁵.

La temperatura superficial es el resultado físico del balance de energía que sobre ella tiene lugar, donde los flujos radiativos pueden tener un peso variable. Para analizar este aspecto, se ha estimado el balance radiativo en ondas largas y el global en dos puntos de la fachada Norte (N1 y N3) (Figura 4.66 y Figura 4.67).

En **ondas largas**, los puntos analizados pierden energía a razón de 20-50 W/m² aproximadamente. Las pérdidas en N1 serán fundamentalmente hacia el cielo, ya que la temperatura del resto de superficies será similar a la de N1. En cambio, N3 (más caliente que su entorno) perderá energía tanto hacia el cielo como hacia las superficies vecinas.

Por su parte, el aporte en **ondas cortas** dependerá de la reflectividad del material, llegando a los 200 W/m² en N3 (punto con mayor absorción). En consecuencia, el **balance radiativo global** será negativo durante la noche y de signo variable durante el día, según la cantidad de energía absorbida por el punto. En los puntos muy reflectivos, éste podrá ser neutro o ligeramente positivo/negativo durante una parte considerable de la jornada; en cambio, en los muy absorbentes, el balance global será siempre positivo (de hasta +150 W/m² en el caso de N3).

⁵ El flujo absorbido en onda corta SW (amarillo) se calculó multiplicando la radiación solar total incidente (directa del sol + difusa del cielo + reflejada) calculada en el software Radiance, por el coeficiente de absorción de la superficie (Tabla 4.4).

El flujo emitido en ondas largas por la superficie fue calculado como $L=\varepsilon\cdot\sigma\cdot T^4$, a partir de la Temperatura extraída de las termografías en dichos puntos y con la emisividad recogida en la Tabla 4.4.

El flujo absorbido en ondas largas por la superficie se ha calculado como la sumatoria de todos $L=VF\cdot\varepsilon\cdot\sigma\cdot T_m^4$, siendo T_m la temperatura promedio de la superficie considerada. En el caso del pavimento y los edificios vecinos, se obtuvo a partir del análisis de las regiones de interés. En el caso del cielo la temperatura promedio fue aproximada tal como se explica en el epígrafe anterior.

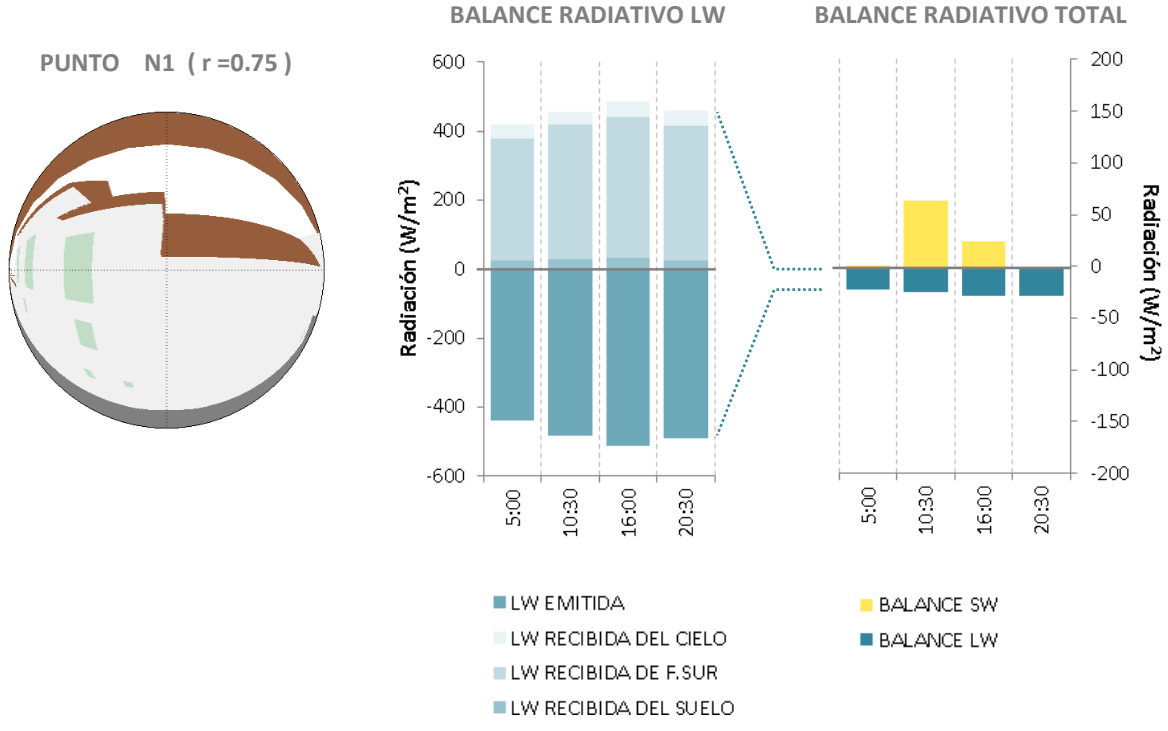


Figura 4. 65. Balance radiativo en LW y Total en el punto N1

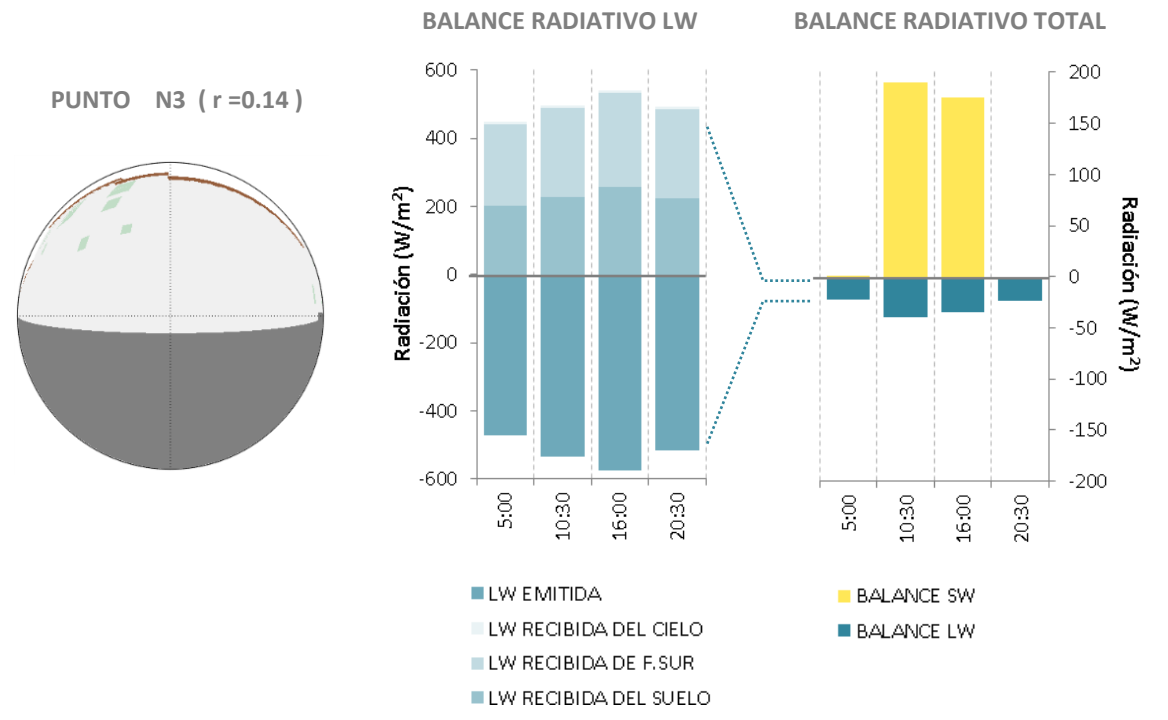


Figura 4. 66 Balance radiativo en LW y Total en el punto N3

4.3.6 Comentarios finales del caso de estudio

En este caso de estudio, se ha evaluado el comportamiento radiativo de las superficies de la *Calle de las Rejas de Don Gome* de Córdoba. El punto de partida de este trabajo fue una campaña de mediciones llevada a cabo durante un día soleado de verano (25 de julio de 2017) que incluyó fotografías, termografías y varios parámetros ambientales. Para ayudar a la interpretación de las temperaturas obtenidas se realizaron dos tipos de análisis adicionales a partir de un modelo 3D de la zona de estudio. Por un lado, se caracterizó geométricamente el entorno desde un punto de vista radiativo empleando el software *HELIODON 2* (factores de vista entre superficies, obstrucciones solares). Por otro, se llevaron a cabo simulaciones de la radiación solar incidente sobre las superficies en el software *RADIANCE*, teniendo en cuenta los valores de reflectividad del entorno real.

[A partir del análisis basado en imágenes: distribución espacio-temporal de temperaturas]

Para proporcionar una visión global de la distribución espacial de temperaturas, se analizó **una secuencia de fotografías y termografías** con una escala común de temperatura. El *time-lapse* mostró que las fachadas Norte y Sur se comportaron de manera similar a lo largo de la jornada, estando la primera ligeramente más caliente que la segunda. Un análisis con una escala más reducida mostró, que en ambas superficies existe un gradiente ascendente de temperaturas en la parte más alta (con mayor SVF) y la más baja de la fachada (menor SVF). Las imágenes mostraron que el pavimento, con una baja reflectividad y un asoleo desigual, fue la superficie en la que se registraron las temperaturas más altas y la mayor heterogeneidad de la escena. De estos resultados se deducen los tres fenómenos que gobiernan las temperaturas aparentes superficiales bajo condiciones de cielo despejado y en ausencia de viento: absorción de radiación solar, visión del cielo e inercia térmica.

[A partir del análisis basado en gráficos numéricos: caracterización térmica del cañón]

A continuación, se llevó a cabo un análisis de la evolución de las temperaturas en tres puntos de la fachada Norte, Sur y del pavimento, cuyas características ópticas (reflectividad, emisividad) y geométricas eran conocidas (factores de vista, obstrucciones solares). Los resultados mostraron que, por el efecto combinado de un entorno altamente reflectivo y las diferencias locales en el coeficiente de reflexión, en la fachada Norte (concretamente en su zócalo) se registraron temperaturas hasta 6°C superiores a las de la Sur.

En los puntos analizados en fachada, se estudió además la correlación entre *sky view factor* y las temperaturas aparentes obtenidas de las termografías. Se mostró que a consecuencia de las diferencias en la cantidad de cielo visible, la temperatura superficial de los puntos podía variar hasta casi 8°C. Los resultados recalcaron la importancia de la cantidad de cielo visible, pero también de la parte de cielo que se observa, dado el reparto anisótropo de las temperaturas sobre la bóveda celeste.

[Reflexiones globales sobre el caso de estudio]

En entornos compactos con fachadas altamente reflectivas, como el estudiado, bajo condiciones de verano:

- Las fachadas enfrentadas presentan comportamientos radiativos similares, tanto en ondas cortas (debido a las inter-reflexiones), como largas (temperaturas similares). La orientación de la trama es, por tanto, un factor poco influyente sobre la temperatura de las superficies de fachada.
- En cambio, será la visión del cielo el factor morfológico clave que gobierna las diferencias de temperatura entre los distintos puntos de la fachada, lo que genera un marcado gradiente térmico entre la parte superior e inferior de las mismas.
- La alta reflectividad de las fachadas hará que éstas no se sobrecalienten y que su temperatura evolucione en paralelo a la del aire. Sin embargo, se creará un ambiente radiativo con numerosas inter-reflexiones en los que elementos oscuros y “en sombra” pueden aumentar localmente su temperatura.
- La abundancia de energía reflejada en ondas cortas afectará negativamente al confort térmico/lumínico del peatón.

4.4. CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO

En este Capítulo, se ha analizado el comportamiento térmico a lo largo de la jornada de las superficies de dos cañones urbanos: la *Rue des Tonneliers* en Bayona y la *Calle de las Rejas de Don Gome* en Córdoba. Ambas calles cuentan con una orientación de fachadas Norte-Sur, con una ligera desviación (-15° y $+11^\circ$ respectivamente). Y, aunque las dimensiones de sus edificaciones difieran en valor absoluto, la proporción geométrica del entorno urbano es similar: $W/H_{\text{TONNELIERS}} = 0.42$ y $W/H_{\text{REJAS}} = 0.53$. En ambos casos, las campañas de medición se llevaron a cabo bajo cielo despejado, buscando la situación en la que se producen las mayores diferencias térmicas en el ambiente.

Las temperaturas aparentes de las superficies construidas que se registraron en ambos entornos difirieron de manera notable. En el caso de Bayona, éstas oscilaron entre 3.2°C y 36.0°C , y en Córdoba entre 16.9°C y 64.7°C , extremos registrados en cubierta y fachada Oeste respectivamente. Por este motivo, llevar a cabo una comparación directa entre los comportamientos térmicos de ambos entornos en términos absolutos nos proporcionará una información limitada. Sin embargo, contraponer sus comportamientos en términos relativos, evaluando las diferencias de las temperaturas superficiales con respecto a la del aire en cada momento, puede resultar más revelador, como veremos a continuación.

Antes del amanecer, en ambos entornos, las diferencias con respecto al aire son pequeñas, oscilando entre -4.8°C y $+2.9^\circ\text{C}$ en Córdoba y entre $+3.6^\circ\text{C}$ y -2.5°C en Bayona. En este momento, el factor que gobierna las diferencias de temperatura entre los distintos puntos de la escena será la visión del cielo, un parámetro dependiente exclusivamente de la geometría del entorno. En el caso de las fachadas, los cambios en el factor de vista del cielo se traducen en un marcado gradiente térmico entre la parte superior e inferior de las mismas, de hasta 7.7°C en Córdoba y de 6.8°C en Bayona.

Con la salida del sol, comienza un sobrecalentamiento de las superficies con respecto al aire, cuyos máximos varían en función del caso de estudio (Figura 4.69)⁶:

- En Córdoba, las máximas diferencias entre el aire y las fachadas principales se produjeron, en la fachada Sur, hacia medio día y fueron de 4.6°C ; y en la Norte, por la tarde, llegando a ser de 7.2°C .
- En Bayona, las máximas diferencias entre el aire y las fachadas principales tuvieron lugar, en la fachada Sur, por la tarde y fueron de 16.2°C ; mientras que, en la Norte, se dieron por la mañana y alcanzaron los 3.6°C .

La diferencia de comportamiento que encontramos entre estos entornos, no es explicable únicamente a partir de las diferencias de radiación incidente sobre las fachadas (relativamente pequeñas), sino que debe interpretarse en base a sus diferencias materiales (Figura 4.68).

⁶ Las diferencias entre temperatura del aire y temperatura de las superficies aquí expresadas están calculadas sobre las temperaturas correspondientes al P5, P95 y la media.

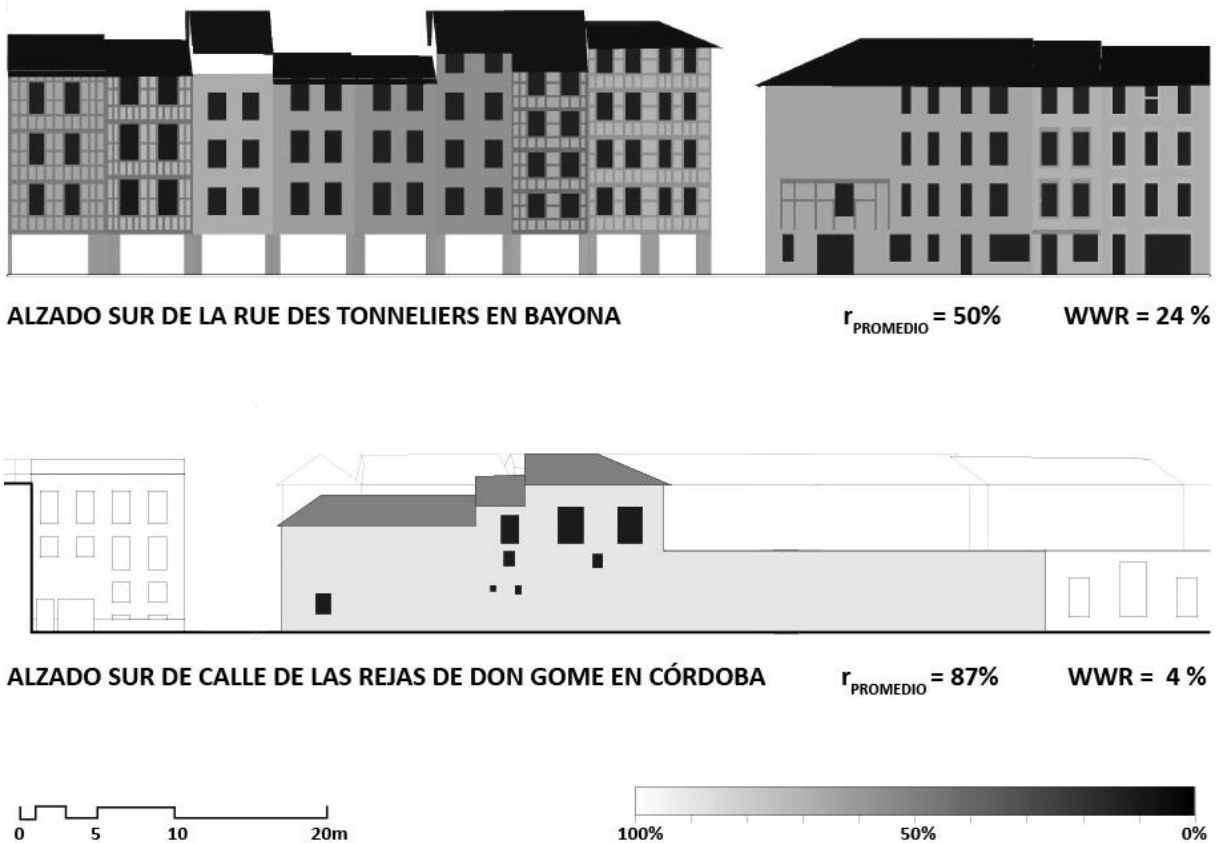


Figura 4. 67 Reflectividad del alzado Sur de *la Rue des Tonneliers* y de *la Calle de las Rejas de Don Gome*.

En el cañón altamente reflectivo (Córdoba), las fachadas presentan comportamientos radiativos similares, tanto en ondas cortas (debido a las inter-reflexiones), como largas (temperaturas parecidas). La orientación de la trama es, por tanto, un factor poco influyente sobre la temperatura de las superficies de fachada. La alta reflectividad de las fachadas hace que éstas no se sobrecalienten y que su temperatura evolucione en paralelo a la del aire. Sin embargo, se crea un ambiente radiativo con numerosas inter-reflexiones, en el que elementos oscuros y “en sombra” pueden aumentar localmente su temperatura.

Por el contrario, cuando la reflectividad es media-baja, como en el caso de Bayona, las diferencias de temperatura entre fachadas y dentro de la misma se extreman. En este caso, existe una coincidencia más directa entre las temperaturas superficiales más elevadas y la mancha solar dibujada por la radiación directa, gobernada básicamente por la orientación.

Desde el punto de vista del arquitecto, las posibilidades de modificación de la geometría general del edificio en entornos urbanos son limitadas: las alineaciones y alturas están reguladas por normativa, la orientación de la calle es una preexistencia, el promotor tenderá a exigir la colmatación de la edificabilidad de parcela, etc. Sin embargo, la libertad de diseño en cuanto a la “geometría fina” y a la materialidad de la fachada es mucho mayor. Ambos aspectos han demostrado tener una influencia notable sobre las temperaturas alcanzadas por las superficies.

RUE DES TONNELIERS (BAYONA)



14:00 (ST)

$T_a = 18.6^\circ\text{C}$

CALLE DE LAS REJAS DE DON GOME (CÓRDOBA)



14:00 (ST)

$T_a = 37.5^\circ\text{C}$

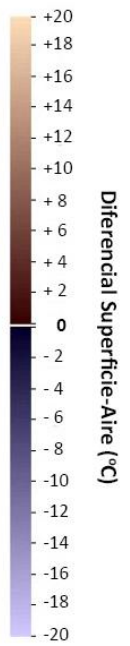


Figura 4. 68 Diferencial de Temperaturas Superficie-Aire a las 14:00 ST en la *Rue des Tonneliers* de Bayona el 23/04/2017 y de la *Calle de las Rejas de Don Gome* de Córdoba el 25/07/2017.

EVALUACIÓN TÉRMICA DE UN ÁREA URBANA MEDIANTE SECUENCIAS DE TERMOGRAFÍAS

5.1 INTRODUCCIÓN

5.2 ANTECEDENTES DE ESTE TRABAJO

5.3 DESCRIPCIÓN DEL CASO DE ESTUDIO

5.4 DESCRIPCIÓN DE LA CAMPAÑA DE MEDICIÓN

5.5 RESULTADOS

5.6 DISCUSIÓN

5.7 CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO

5.1 INTRODUCCIÓN

Tanto el peatón como los edificios intercambian energía y materia con su ambiente exterior más próximo. Las condiciones ambientales de este entorno cercano - microclima -, influyen significativamente sobre el grado de confort que experimenta el usuario, tanto en el espacio público como en el interior de los espacios construidos, afectando al consumo energético de éstos últimos.

Desde siempre, el ser humano ha aplicado estrategias de modificación del microclima para crear condiciones ambientales más próximas al confort, tanto a nivel de edificio como a escala urbana. Actualmente estas estrategias cobran un renovado interés en el contexto del cambio climático, y a la luz del deterioro de la vida urbana y de su calidad ambiental. Reflejo de ello es, por ejemplo, la reciente publicación del estudio de Santamouris et al. (2017), donde se analiza el potencial de refrigeración de 220 proyectos urbanos. En este trabajo, se señala que, para comprender mejor el rendimiento de las diversas técnicas de modificación del microclima y su combinación, bajo diversas condiciones climáticas y límite, es necesario disponer tanto de simulaciones precisas como de datos experimentales de aplicaciones a escala real (Santamouris et al. 2017). Precisamente este último aspecto es una de las motivaciones del trabajo llevado a cabo en los siguientes epígrafes.

En este Capítulo, nos interesamos por una estrategia microclimática recurrente en ambientes urbanos: los entoldados (Figura 5.1). El toldo tiene efectos directos e indirectos sobre el microclima urbano en el que se inserta, complejos de evaluar de manera integral. Por un lado, genera una obstrucción solar que disminuye la radiación solar incidente sobre las superficies (contribución directa). Por otro, limita la subida de las temperaturas superficiales, un efecto que puede mantener más fresco el aire interior del cañón (contribuciones indirectas), siempre que la extensión del área entoldada sea suficientemente grande, como mostraban Paolini et al. (2014).



Figura 5. 1. Imágenes de toldos urbanos: c/Trapería en Murcia ,1905 (Fuente: Twitter RaicesMurcianas); C/Sierpes de Sevilla, 1918 (Fuente: blogtoldoschamorrosevilla.es), c/Preciados y c/Arenal en Madrid, 2018. (Fuente: Carlos F. López).

En este trabajo, se analizará un área urbana entoldada en Córdoba, ciudad en la que la severidad del clima estival se traduce en situaciones de desconfort y estrés térmico para el usuario de los espacios públicos, y en un elevado consumo energético para climatización en la edificación.

La metodología general desarrollada en esta tesis, descrita en el *Capítulo 3*, será aquí aplicada a la evaluación térmica de un área urbana que trasciende del cañón urbano individual. Se analizará en paralelo el comportamiento térmico de varios cañones urbanos, valorando desde una perspectiva cuantitativa y cualitativa la repercusión del toldo sobre la temperatura de las superficies urbanas a lo largo del día. Este estudio pretende valorizar desde un punto de vista microclimático los efectos climáticos del toldo en un entorno real, como aportación complementaria a los estudios sobre el tema basados en simulación (Paolini et al. 2014) o los llevados a cabo en entornos a escala (Shashua-Bar et al. 2011), como el mostrado en la Figura 5. 2.

El presente capítulo comienza exponiendo los antecedentes de este trabajo experimental, consistentes en un estudio sobre el potencial del toldo de reducir la demanda de refrigeración, basado en simulaciones energéticas (*epígrafe 5.2*). A continuación, se describen las características del entorno de estudio (*epígrafe 5.3*) y de la campaña de mediciones llevada a cabo (*epígrafe 5.4*). Los resultados de las temperaturas superficiales obtenidos (*epígrafe 5.5*) son discutidos espacial y temporalmente en relación a aspectos materiales y geométricos (*epígrafe 5.6*). Finalmente, se exponen las conclusiones obtenidas del caso de estudio, tanto de tipo energético-ambiental como sobre la aplicación de la metodología (*epígrafe 5.7*).

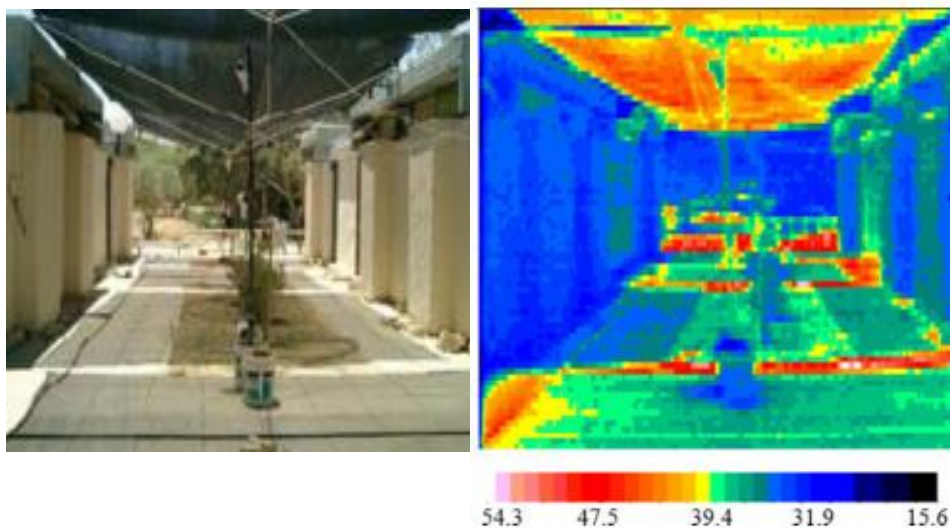


Figura 5. 2. Fotografía y termografía de un modelo a escala de entorno urbano entoldado a las 12:20 LST del 17/07/2007 en Negev, Israel (Shashua-Bar et al. 2011).

5.2 ANTECEDENTES DE ESTE TRABAJO

En trabajos previos realizados por la doctoranda (García-Nevado 2013; Garcia-Nevado & Coch 2015), se estudió la efectividad del toldo urbano como estrategia para reducir el consumo de refrigeración del edificio a nivel individual en climas con un verano severo. El análisis realizado se basó en simulaciones dinámicas de demanda energética en edificios residenciales, insertos en un cañón urbano simétrico e “infinito” ubicado en la ciudad de Córdoba (Figura 5. 3). Se llevaron a cabo simulaciones de la demanda de refrigeración en el software *DesignBuilder* (DesignBuilder 2009) en dos situaciones: con toldo y sin toldo. La efectividad del dispositivo se valoró a partir de la reducción de demanda generada por el elemento de sombra, considerando los dos edificios enfrentados.

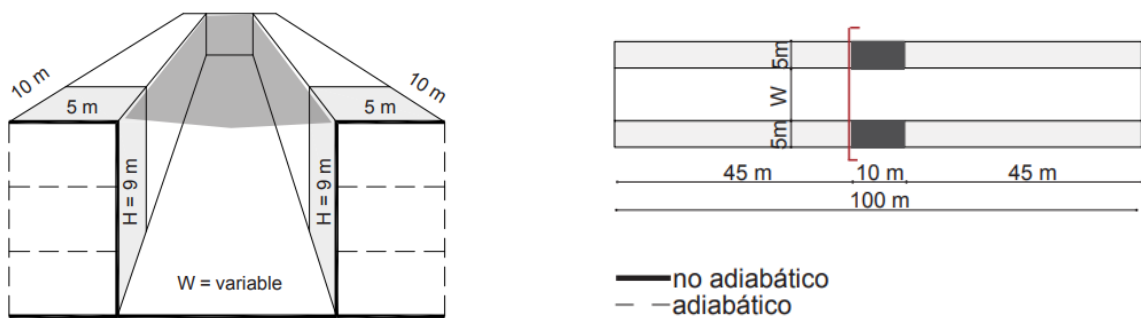


Figura 5. 3. Esquema del modelo geométrico empleado en las simulaciones.

El trabajo se proponía estudiar la influencia de las características materiales y geométricas, tanto del edificio, como del toldo y de la calle donde se instala, sobre la efectividad del toldo como elemento reductor de la demanda de refrigeración. Se seleccionaron **6 variables de estudio** y se llevó a cabo un análisis paramétrico basado en las posibles combinaciones de los valores que éstas podían tomar (Tabla 5.1):

CARACTERÍSTICAS		VARIABLES DE ESTUDIO	VALORES ASIGNADOS
Geométricas	Del Tejido urbano	Orientación de fachada	N-S / E-O / SE-NO
		Relación de aspecto (W/H)	0.4/ 0.7 / 1
Materiales	De la envolvente del edificio	Perforación (WWR)	15% / 30%
		Aislamiento (U)	U / (U/3)
		Pesantez (M)	M / (M/4)
	Del toldo	Obstrucción solar (%)	80% / 50%

Tabla 5. 1. Variables de estudio seleccionadas para el análisis paramétrico de la efectividad del toldo.

Este análisis permitió ordenar dichas variables según su influencia sobre la capacidad total del toldo de reducir la demanda, con el objetivo de realizar recomendaciones sobre las condiciones en las que la instalación del toldo puede ser más ventajosa (Figura 5. 4).

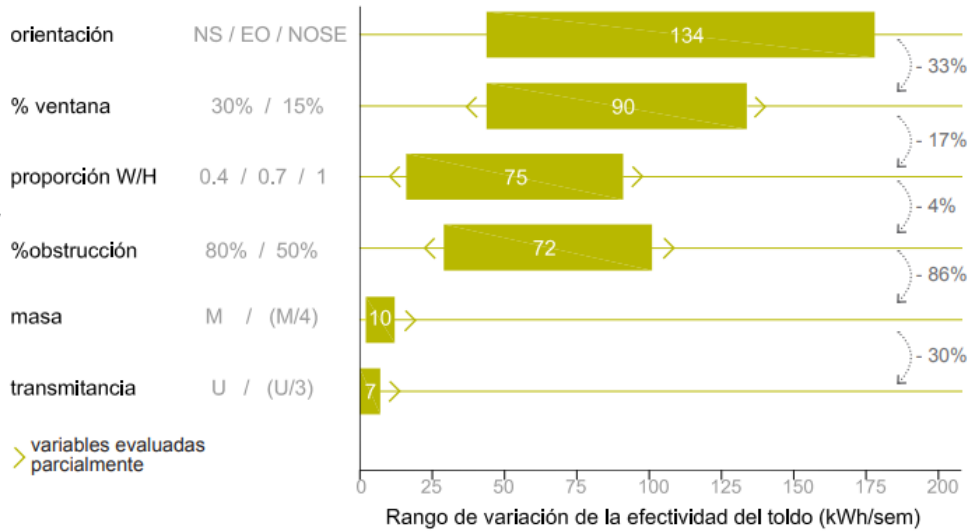


Figura 5. 4. Importancia relativa de las variables estudiadas sobre la efectividad del toldo.

La **configuración geométrica de la calle**, sobre todo, la **orientación**, demostró ser el aspecto más influyente sobre la efectividad del toldo. A este respecto, se mostró que la presencia del toldo urbano genera reducciones de demanda más significativas en calles con fachadas orientadas E-O, a continuación en las NO-SE o NE-SO y, finalmente, en las N-S (Figura 5. 5). Asimismo, se comprobó que a mayor proporción W/H de calle, mayor efectividad del toldo urbano, un efecto que se agota para la proporción W/H = 4, a partir de la cual la efectividad del toldo permanece constante.

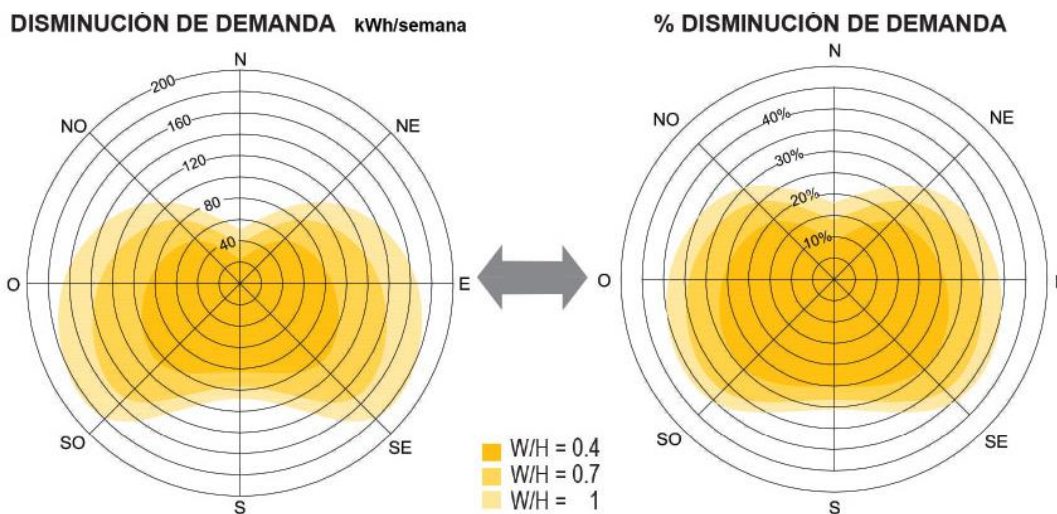


Figura 5. 5. Disminución de demanda de refrigeración según proporción W/H por orientaciones.

Entre las **características materiales de la envolvente estudiadas**, se subrayó el papel clave del nivel de **perforación de la fachada urbana** en relación a la efectividad del toldo: a mayor tasa de acristalamiento, mayor reducción de demanda gracias al toldo (Figura 5. 6). Este dispositivo mostró eficacias similares, independientemente de la inercia y el aislamiento de la fachada, lo que lo convierte en una estrategia positiva para tejidos urbanos existentes y para nuevos desarrollos.

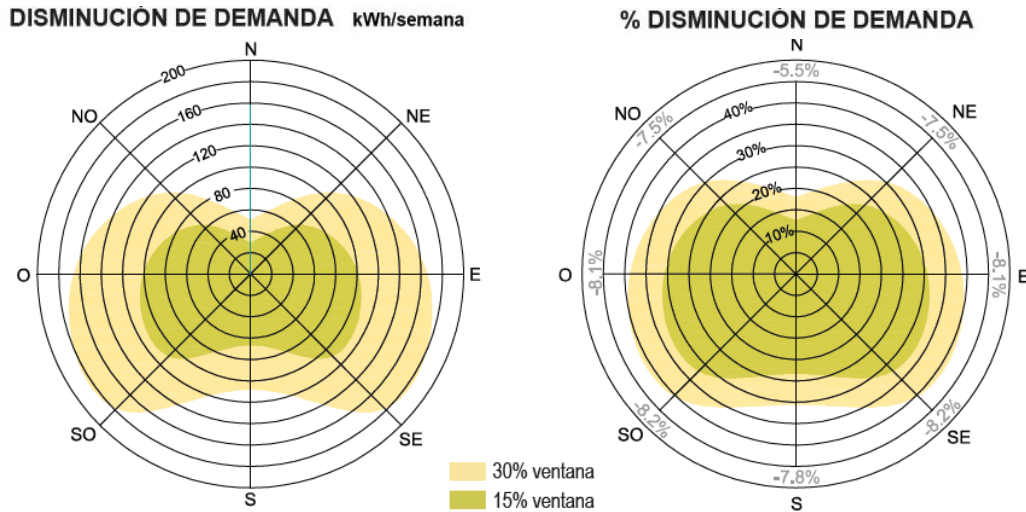


Figura 5. 6. Disminución de demanda de refrigeración según %WWR por orientaciones en una calle W/H=1.

Finalmente, la **obstrucción solar del tejido se reveló como un factor clave en relación a la efectividad del toldo**. Se trata de una variable de gran importancia, puesto que una reducción excesiva (por debajo del 50%), puede minimizar las ventajas competitivas de este tipo de dispositivos a escala urbana, frente a los toldos instalados en las ventanas.

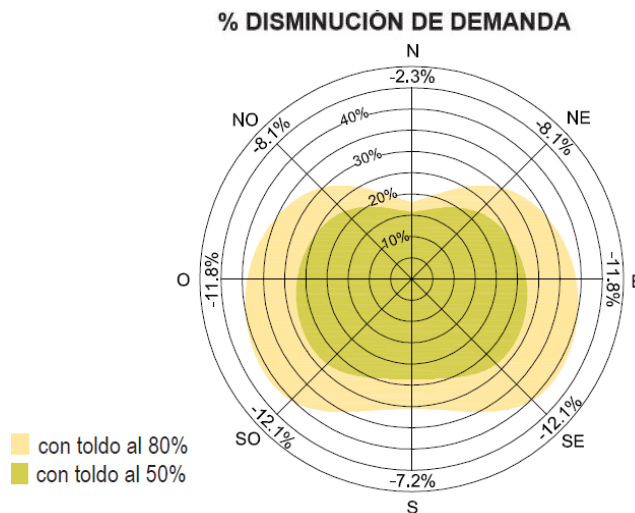


Figura 5. 7. Disminución de demanda de refrigeración según la obstrucción solar del toldo, por orientaciones en una calle W/H=1.

Conclusiones extraídas de las simulaciones y su relación con el presente caso de estudio experimental.

Según las simulaciones, el toldo urbano posibilita reducciones de demanda de refrigeración de hasta el 45% en calles con fachadas orientadas a Este y Oeste. Esto supone una reducción significativa de las necesidades energéticas para climatización a nivel individual de edificio, de hasta 1.5 kWh/m² semana (equivalente a 180 kWh/semana en el edificio test).

Se observó que, en presencia del toldo urbano, las demandas de refrigeración de los edificios tienden a igualarse, una especie de “democratización” de las necesidades energéticas que ocurre independientemente de las características de su envolvente y del entorno urbano donde se ubican. Este comportamiento recalca la influencia de los flujos radiativos en la heterogeneidad de las condiciones ambientales urbanas.

Para contextualizar la magnitud de los resultados obtenidos y su validez, realizaremos varios comentarios sobre las características del trabajo:

Algunas de las reservas a la hora de valorar los resultados están relacionadas con la **modelización del entorno urbano**. Este estudio se realizó sobre un modelo tipológico, donde el toldo instalado cubría la totalidad de la calle, de tal forma que el edificio test estaba siempre a la sombra. Esta situación rara vez ocurre en entornos reales, donde la sombra del toldo es “dinámica” y varía en el tiempo. Además, en esta simulación, los edificios del entorno se modelaron como simples cajas con una reflectividad fija, una aproximación alejada de la heterogeneidad material de las fachadas urbanas reales.

Otras limitaciones de este estudio tienen que ver con las **capacidades del simulador**. *DesignBuilder* (DesignBuilder 2009), software que integra el motor de cálculo *EnergyPlus*, está diseñado y validado para la evaluación del comportamiento energético a escala de edificio (Crawley et al. 2008). Sin embargo, las interacciones energéticas del edificio con su entorno se abordan desde una perspectiva simplificada, sobre todo en lo referido al balance radiativo de onda larga de las superficies. *DesignBuilder* asume que las superficies del edificio están a una temperatura uniforme y que todos los elementos externos a él (protecciones solares, edificaciones vecinas, pavimento, etc), se encuentran a la temperatura del aire. Este enfoque, bajo ciertas circunstancias, puede llevar a desviaciones significativas de demanda, como demostraron Bouyer et al. (2011). Asimismo, debe tenerse en cuenta que las disminuciones de demanda calculadas son el resultado de la protección de la fachada frente a la radiación solar directa, pero no se tienen en cuenta otros posibles efectos microclimáticos de segundo orden, como la posible bajada de la temperatura del aire en extensas áreas entoldadas.

Como contrapunto a este enfoque de simplificación, se propuso la realización de una campaña de medición en un área urbana entoldada “real”, con toda su complejidad geométrica y material, bajo condiciones ambientales típicas de verano. Los resultados de este estudio pueden ayudar a valorar los verdaderos efectos ambientales de dicho dispositivo en entornos reales, así como servir de caso test para la calibración de simuladores ambientales.

5.3 DESCRIPCIÓN DEL CASO DE ESTUDIO

En el centro de Córdoba existe un área peatonal comercial estructurada en dos ejes perpendiculares que confluyen en la Plaza de las Tendillas. El eje que discurre en dirección Norte-Sur está conformado por la c/Ángel de Saavedra, la c/Jesús y María y la c/José Cruz Conde; el eje Este-Oeste, por la c/Gondomar y la c/Concepción (Figura 5.8). Desde el año 2002, el Ayuntamiento de Córdoba, en colaboración con la asociación de comerciantes del CENTRO CÓRDOBA, vienen trabajando en el entoldado de este conjunto de calles, iniciativa que poco a poco ha ido extendiéndose (Castro del Río 2018). En el verano de 2018, momento en que se llevó a cabo la presente campaña, los toldos ocupaban 2980 m², lo que representa el 22% de la superficie de estas calles. Para las próximas temporadas de verano, el consistorio pretende ampliar la zona entoldada, hasta cubrir más de la mitad de su superficie en planta (Figura 5.8). Anualmente, estos dispositivos comienzan a instalarse la primera semana de mayo, y a desmontarse la primera de octubre (Castro del Río 2018). Esto implica que, los toldos permanecen instalados durante 4 meses, lo que representa un tercio del año.

Con motivo de este estudio, se contactó con la persona responsable del proyecto de entoldado del Área de Infraestructuras del Ayuntamiento de Córdoba (Mercedes Castro del Río). Desde la Administración, se mostró un especial interés por conocer los efectos “no visibles del toldo”, como sería su repercusión a nivel térmico. Se nos trasladó la de disponer de datos cuantitativos que justificasen el interés ambiental del toldo en este entorno concreto, como argumento adicional en favor de la instalación.

5.3.1. Características geométricas del entorno

En este entorno urbano entoldado, se pueden distinguir **cuatro zonas**, que asociaremos con sendas áreas de medición. Dos de ellas pertenecen al eje Norte-Sur (amarillo), por lo que están formadas por cañones urbanos con fachadas orientadas hacia Este y Oeste (Figura 5.9). Las otras dos se ubican en el eje Este-Oeste (azul), estando limitadas por fachadas orientadas a Norte y Sur. En este estudio, designaremos los cañones por la orientación de sus fachadas, hablando a partir de ahora simplemente de **cañones Este-Oeste** (EO, amarillo) y **cañones Norte-Sur** (NS, azul).

Desde el punto de vista geométrico, esta área urbana puede considerarse una **trama urbana compacta**, con calles estrechas y edificios de altura variable. Prueba de ello sería el hecho de que la relación de aspecto W/H promedio de los cañones que la integran es menor a 1, oscilando entre los 0.55 y los 0.77. Para complementar el análisis de este caso de estudio, se ha levantado un modelo 3D de tipo morfológico del área urbana analizada, con un nivel de detalle LOD2.1 (Biljecki et al. 2016), incluyendo los toldos con su dimensión y posición reales. Introduciendo este modelo en HELIODON 2 (Beckers & Masset 2006), se han obtenido diagramas estereográficos en varios puntos situados en el centro de las calles estudiadas. Estos gráficos evidencian, en primer lugar, el elevado nivel de obstrucción solar generado por las edificaciones en este entorno y, en segundo lugar, el papel del toldo como elemento de sombra adicional cuyo efecto se suma a la obstrucción generada por las edificaciones (Figura 5.9; Figura 5.10.).

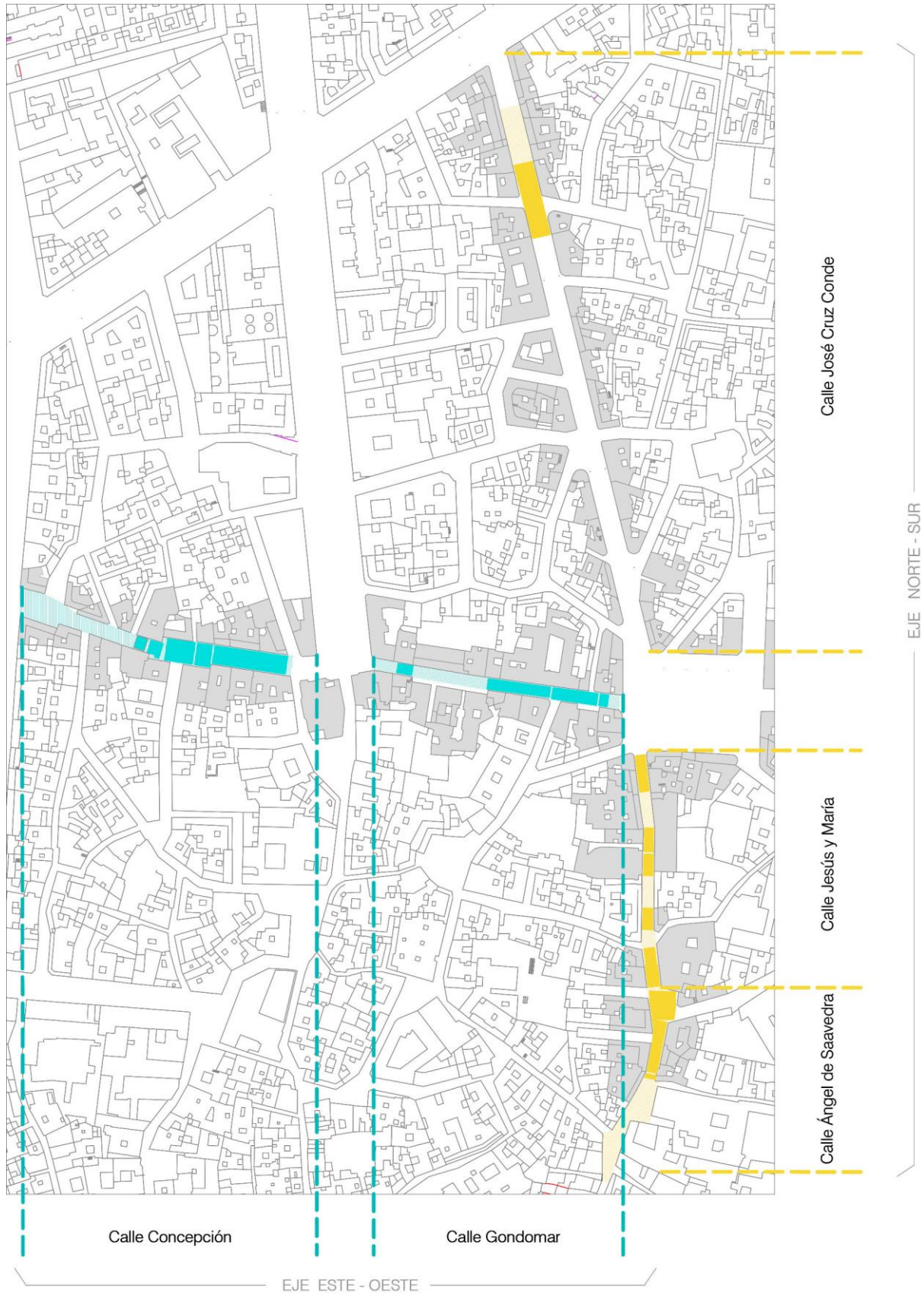


Figura 5.8. Superficie de toldos en la temporada 2018 (color sólido) y previsión para la próxima (rayado).

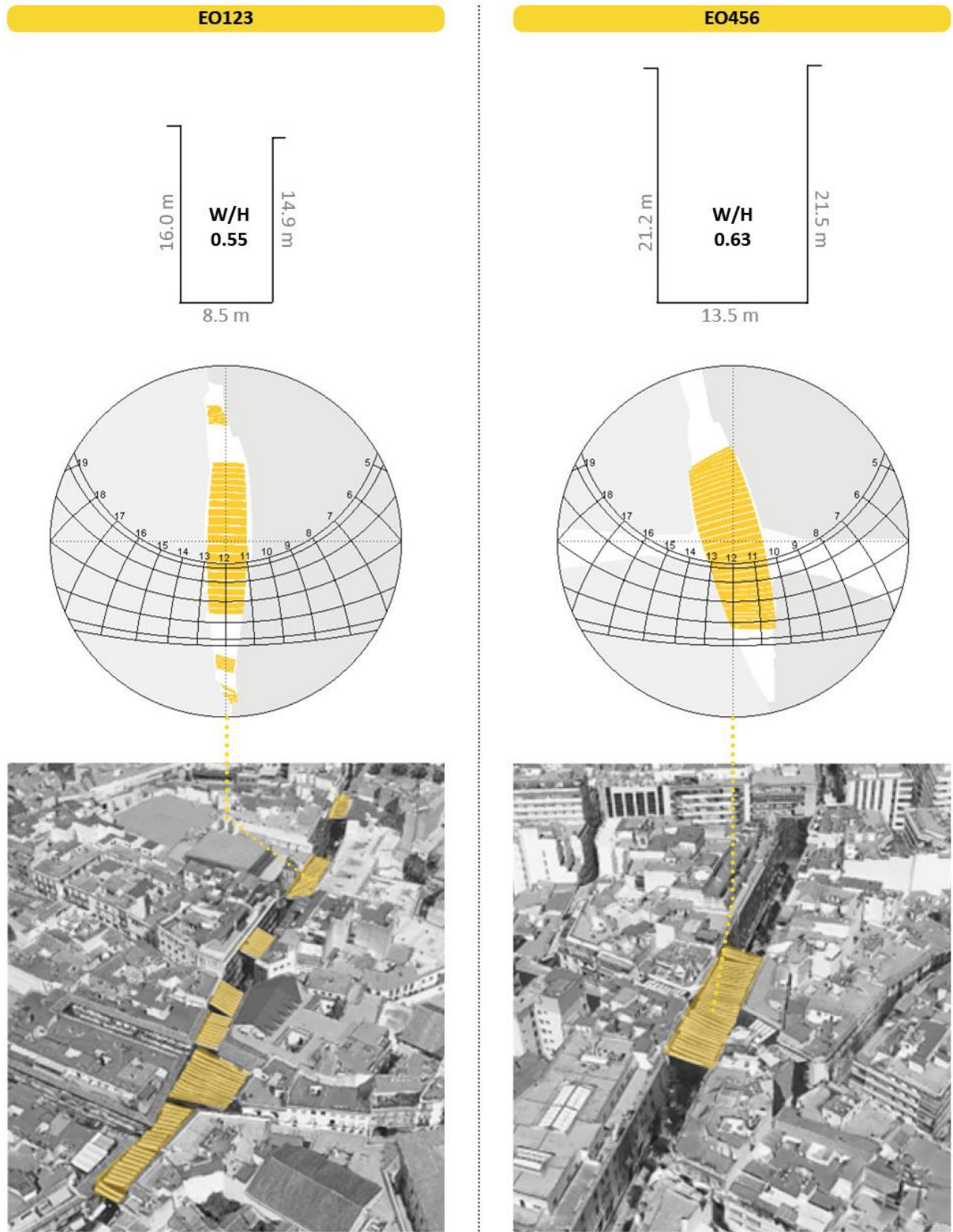


Figura 5.9. Imágenes aéreas de las dos áreas urbanas entoldadas del centro peatonal de Córdoba formadas por calles Este-Oeste e información geométrica sobre las mismas.

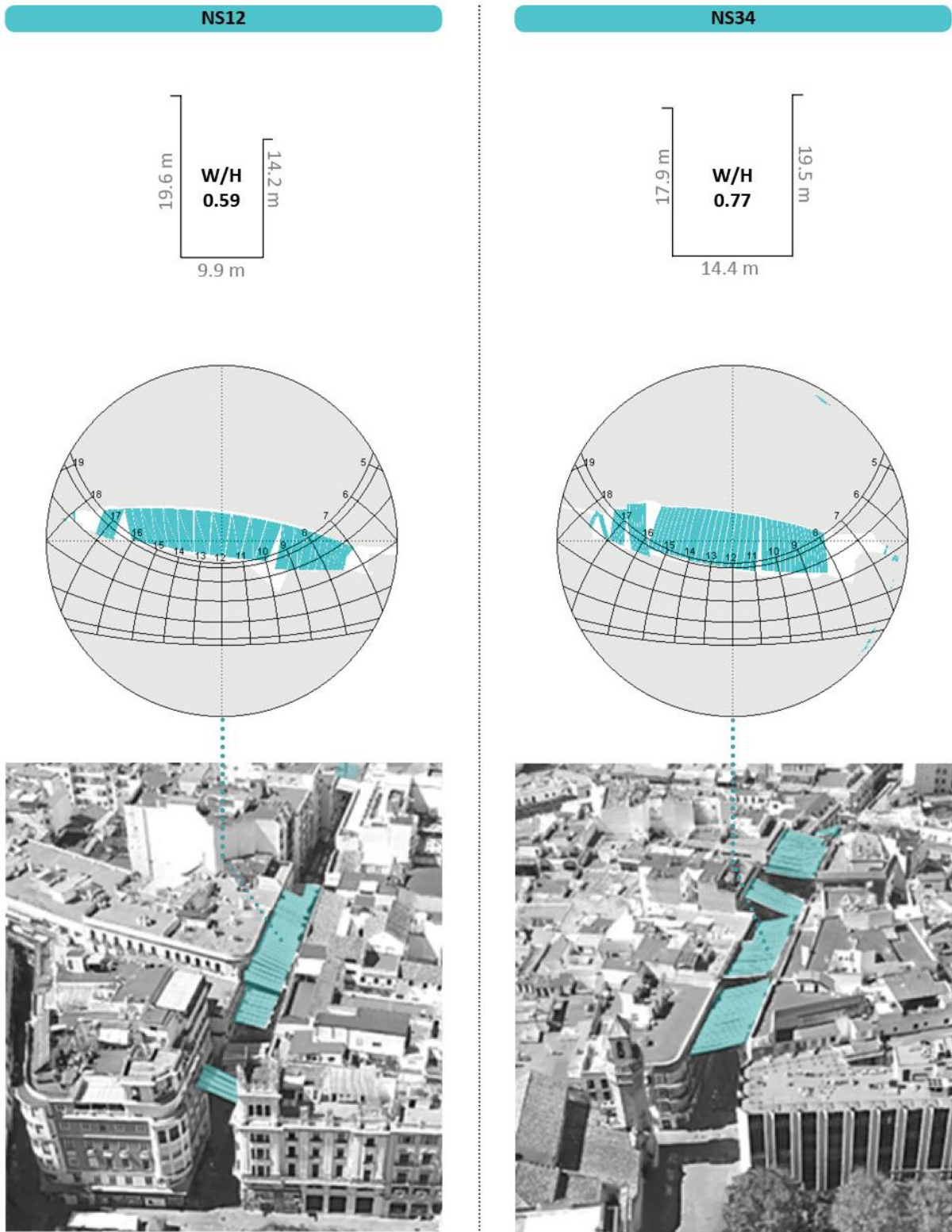


Figura 5.10. Imágenes aéreas de las dos áreas urbanas entoldadas del centro peatonal de Córdoba formadas por calles Norte-Sur e información geométrica sobre las mismas.

5.3.2. Características materiales del entoldado

Los toldos del área urbana estudiada están formados por un tejido micro-perforado de poliéster recubierto de PVC (Castro del Río 2018). Se trata de piezas fijas, sustentadas mediante cables con tensores en sus extremos, formando ondas en sentido perpendicular a las fachadas (Castro del Río 2018). Las piezas rectangulares tienen una anchura de 130cm y las triangulares de 260cm y una longitud coincidente con el ancho de la calle. La distancia entre piezas adyacentes es de aproximadamente 20cm y, entre éstas y las fachadas, de unos 80cm. Esta disposición y la microestructura perforada del tejido, además de disminuir el “efecto vela” provocado por el viento, permiten la evacuación del aire caliente hacia la parte superior del cañón por convección libre (el posible aumento de temperatura del aire por “estancamiento” puede desprejarse).

Entre los distintos toldos instalados existen diferencias materiales y en relación a su estado de conservación que podrían resultar en comportamientos y eficacias variadas. Como paso previo al estudio de la influencia térmica de las propiedades materiales del toldo, se llevaron a cabo dos trabajos experimentales para la caracterización de las propiedades ópticas de los tres tipos de toldos instalados caracterizados por su porcentaje de perforación (Figura 5. 11.): 5% (A), 18% (B) y 28% (C).

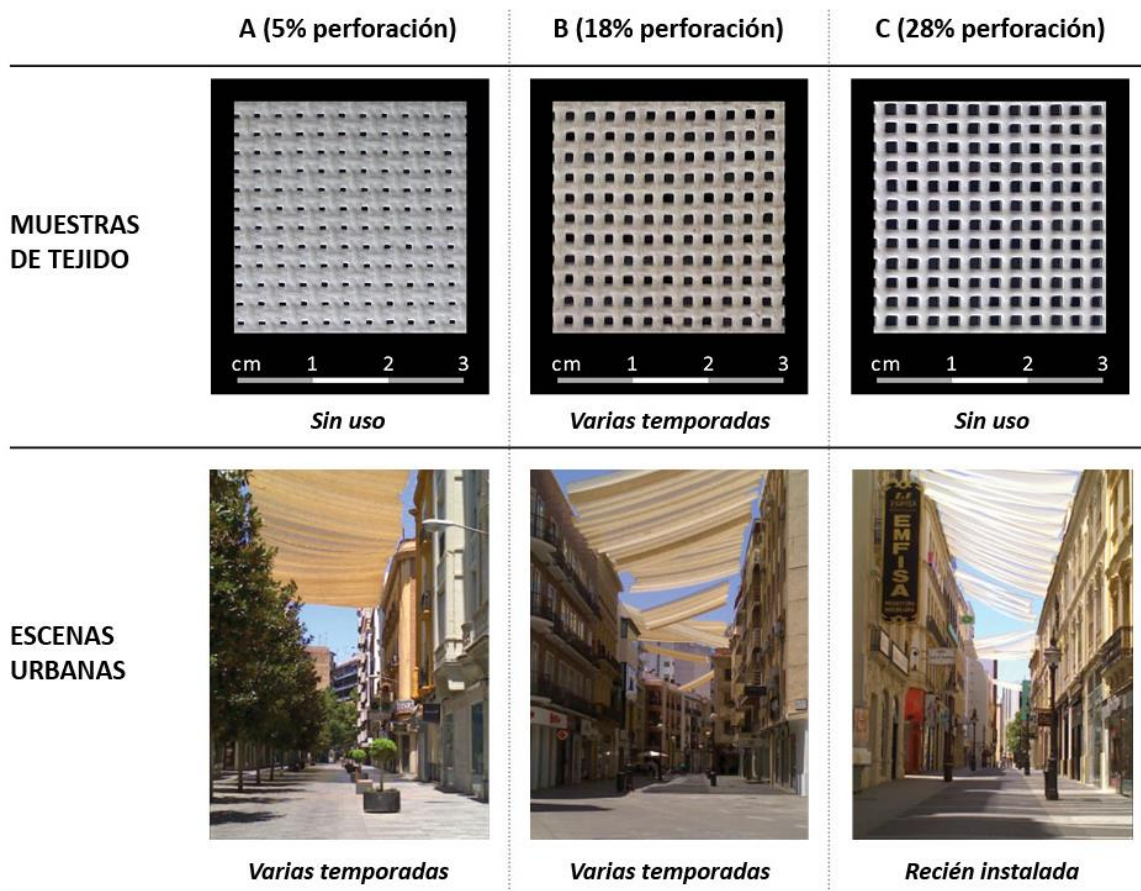


Figura 5. 11. Imágenes de las muestras de toldos y escenarios urbanos entoldados estudiados experimentalmente.

Por un lado, se caracterizaron, bajo condiciones controladas, las muestras de los tejidos de toldos instalados facilitadas desde el área de Infraestructuras del Ayuntamiento, cuantificándose su nivel de perforación (%), obstrucción solar (%) y reflectancia visible (%), como se detalla en el Anexo E. Tanto el grado de obstrucción solar como de reflectancia se midieron en base a proporciones de iluminancia en la dirección normal al tejido ($\alpha = 0^\circ$). (Estos valores pueden considerarse válidos para hasta ángulos de incidencia $\alpha = 60^\circ$, mientras que para ángulos más tangentes, sería esperable un incremento en el valor de ambos parámetros. Esto implica que podrían existir variaciones en el comportamiento del toldo según la hora, un aspecto que no será considerado en esta tesis).

Por otro, se llevaron a cabo mediciones *in situ*, bajo condiciones reales del comportamiento de los distintos tejidos, con un ángulo cenital de 23° . Se compararon los valores de iluminancia al sol y a la sombra de los toldos, obteniéndose un segundo valor de referencia para la obstrucción solar (%).

En la Figura 5.12, se recogen los porcentajes de obstrucción solar obtenidos en los tres tipos de tejidos a partir de los trabajos experimentales *in-situ* y sobre muestra. Como era de esperar, los resultados indican que, a mayor perforación, menor obstrucción solar, con porcentajes que oscilan entre el 53% y el 88%. En el caso de los tejidos B y C, la diferencia en el porcentaje de obstrucción entre los tests *in situ* y sobre muestra se debe al aporte de energía asociado a las reflexiones dentro del cañón sobre el pavimento (entre 8-11%), ya que su estado de conservación es el mismo. En el tejido A, del cual sólo se disponía de una muestra sin usar, no es posible realizar esta aproximación por las notables diferencias de conservación con los tejidos instalados en el entorno real.

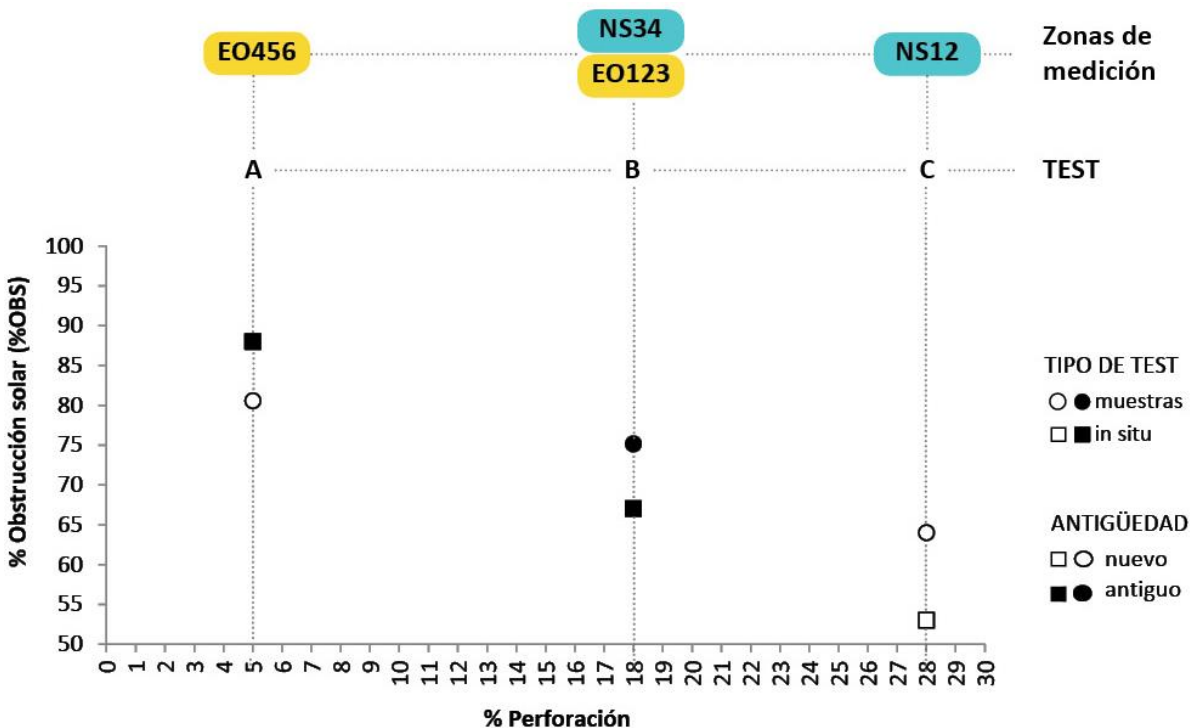


Figura 5. 12. Resultados de tests experimentales sobre muestras y entorno real para la caracterización de los toldos y zonas en las que dichos tejidos se encuentran instalados.

5.4 DESCRIPCIÓN DE LA CAMPAÑA DE MEDICIÓN

El objetivo de la campaña de mediciones era la obtención de **secuencias temporales de imágenes infrarrojas y visibles** en varios cañones urbanos del centro de Córdoba cubiertos por toldos, que permitieran describir y cuantificar su efecto sobre las temperaturas superficiales.

Para ello, se definieron **10 puntos de medición** (Figura 5. 14): 6 en calles en dirección Norte-Sur y, por tanto, con fachadas Este y Oeste (color amarillo); 4 en calles en dirección Este-Oeste y, por tanto, con fachadas Norte y Sur (color azul). En cada localización, se posicionó sobre un trípode la cámara termográfica (FLIR T460, Anexo D), lo más cerca posible del eje de la calle y con una inclinación de 10° sobre el plano horizontal, buscando encuadrar simultáneamente las dos fachadas del cañón, el pavimento y una fracción del cielo y/o toldo.

Entre dichos puntos se trazó un recorrido (EO1 ... EO6, NS1 ... NS4) que se repitió, **en 9 momentos del día**, tomando **imágenes infrarrojas y visibles**. Las medidas fueron programadas a ciertas *horas de interés* distribuidas a lo largo de la jornada, para permitir la “reconstrucción” de la evolución térmica de las superficies a lo largo del ciclo diario como se explica en la metodología general (Capítulo 3). En nuestro caso, dado que para completar el recorrido entre los puntos inicial y final del recorrido se necesitaban aproximadamente 40 minutos, cada ronda se iniciaba 20 minutos antes y finalizaba 20 minutos después de las horas de interés identificadas, asegurando así que la hora real de la toma de imágenes se acercara al máximo a dichos momentos.

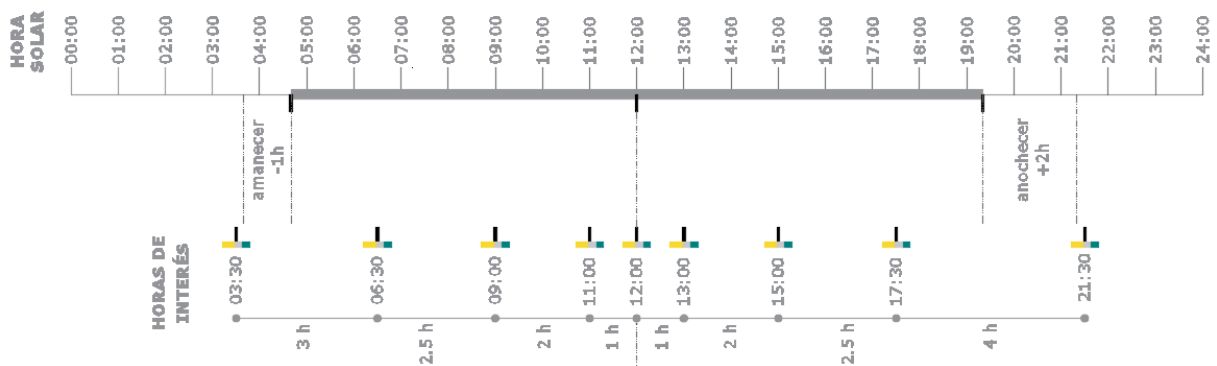


Figura 5. 13. Horas de interés y temporalización de la toma de imágenes para la campaña de medición realizada en Córdoba el día 08/07/2018.

5.4.1 Condiciones ambientales durante la medición

En paralelo a la toma de imágenes, se midieron las condiciones ambientales necesarias para la calibración de las termografías y la interpretación de los resultados. A tal efecto, se definieron cuatro zonas de estudio (EO123, EO456, NS12 y NS34), en las que se registraron la temperatura y humedad a la altura del peatón, con el termo-higrómetro HOB0 (Anexo D) y la velocidad del viento a una altura de 2.2m, con un anemómetro de hilo caliente TESTO i405 (Anexo D).

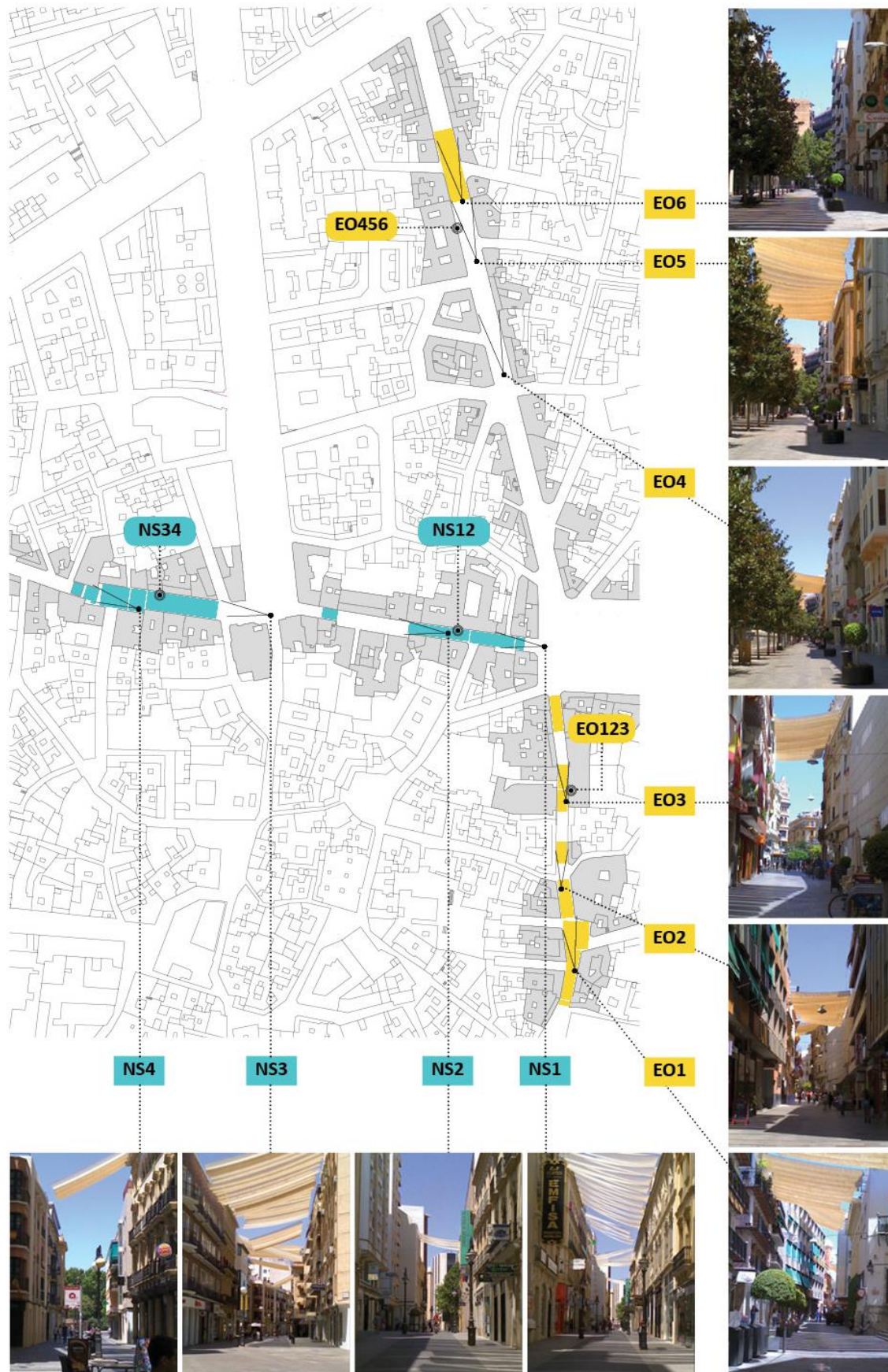


Figura 5. 14. Localización de las áreas y puntos de medición de la campaña de medición realizada en Córdoba (08/07/2018).

En la Figura 5. 15 y la Figura 5. 16 se representan la **temperatura y la humedad relativa del aire** registradas en las zonas de estudio, frente a las obtenidas en la estación meteorológica del aeropuerto de Córdoba, situado a 7.2 km del sitio de medición.

Durante el día de medición, las **temperaturas del aire** del área de estudio oscilaron entre 23.7°C y 36.5°C. Los valores más bajos se registraron en la zona EO123, que se corresponde con la calle más angosta (W/H=0.55) y en la que los toldos cubren una mayor proporción de calle, mientras que los más altos se obtuvieron en el tramo NS34, cuya sección transversal es la más amplia de las estudiadas (W/H=0.77) y cuya superficie entoldada es la más limitada. En todo caso, se observa que las temperaturas máximas en ambiente urbano son más bajas, y las mínimas más altas, que las registradas en el aeropuerto, ubicando en un entorno más rural, evidenciando la existencia del fenómeno de isla de calor en Córdoba (de 6°C el día de medición). Por su parte, la **humedad relativa** en las zonas de medición varió entre 29% y 53%, valores registrados coincidiendo con las temperaturas máximas y mínimas, respectivamente. Dicha oscilación de la humedad relativa fue menor que la del Aeropuerto, donde varió entre el 20-75%.

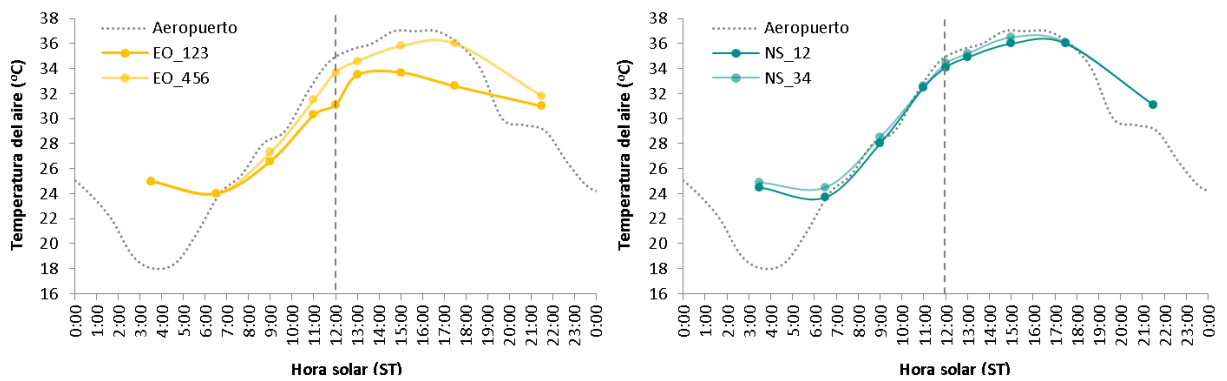


Figura 5. 15. Temperatura del aire registrada en las zonas de medición y en la Est. Meteo. del Aeropuerto (08/07/2018).

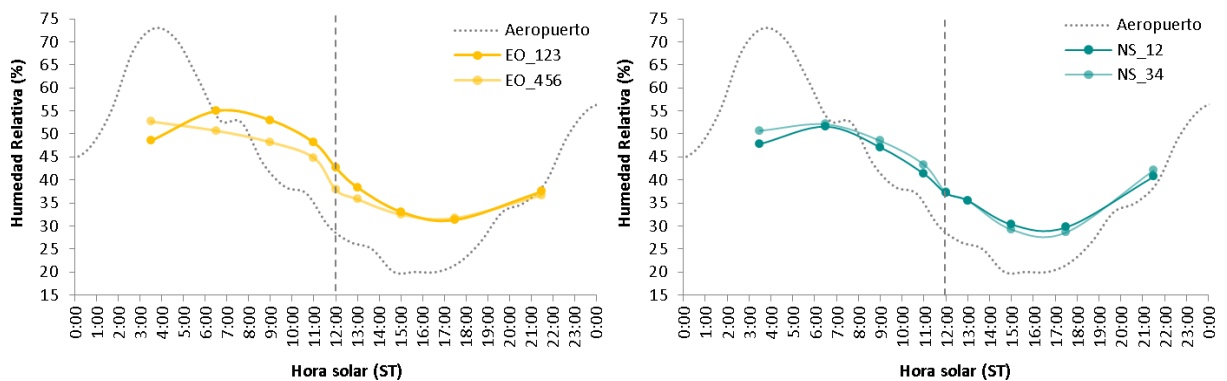


Figura 5. 16. Humedad Relativa registrada en las zonas de medición y en la Est. Meteo. del Aeropuerto (08/07/2018).

La Figura 5. 17 recoge **las velocidades del viento** promedio en las zonas de medición y en el Aeropuerto. Observamos que, durante la campaña, los suaves vientos de la región (<15 m/s) se vieron aún más amortiguados en el interior de la calle, oscilando entre 0.2 m/s (EO123) y 0.72 m/s (NS12). Prácticamente toda la jornada, la velocidad local del viento se mantuvo por debajo de 1 m/s, valor límite expresado en la bibliografía para la interpretación de las termografías (Vollmer & Möllmann 2010).

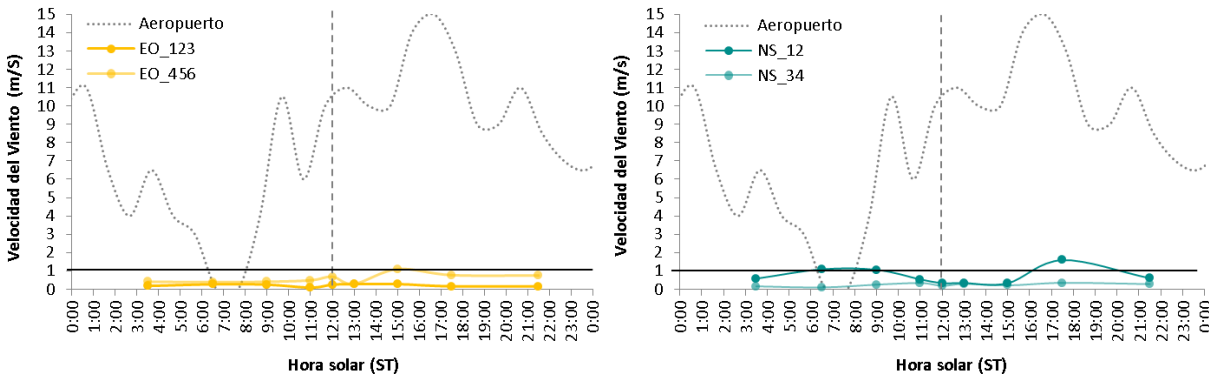


Figura 5. 17. Velocidad del aire medida en las zonas de medición y en la Estación Meteorológica del Aeropuerto.

El día de medición fue una típica jornada de verano en Córdoba, con cielo despejado y alta radiación. En la Figura 5. 18, se representa la **radiación en ondas cortas y largas** sobre plano horizontal medida en la estación meteorológica del Aeropuerto. Dichos valores pueden considerarse como válidos para la zona de estudio, dadas las condiciones atmosféricas despejadas de la jornada y la proximidad entre el Aeropuerto y la zona de medición. Durante la campaña, la irradiancia global de ondas cortas incidente sobre el plano horizontal alcanzó 950 W/m² en las horas centrales del día, acumulándose kWh a lo largo de la jornada, un 85% de los cuales fueron aportados por la componente directa. Por lo que respecta al flujo de radiación infrarroja enviado por la bóveda celeste, observamos que, en promedio, fue de 400 W/m², lo que supone un total de energía de 9.6 kWh durante la jornada.

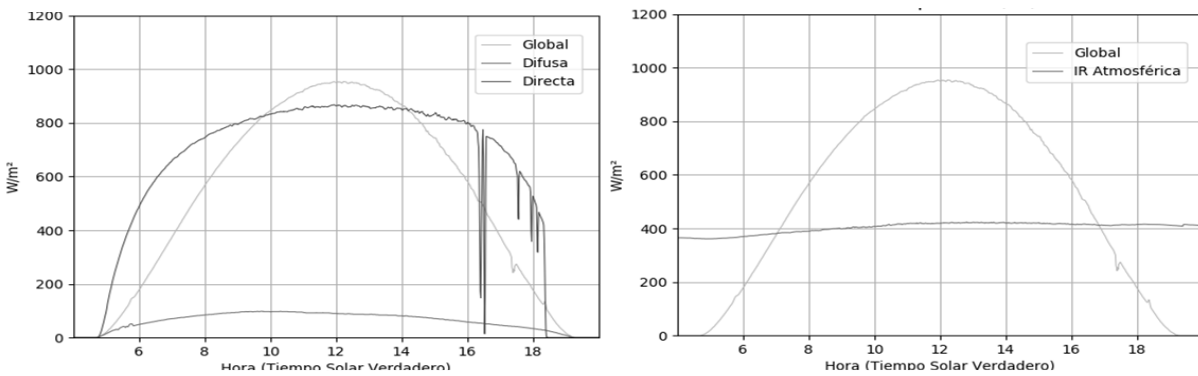


Figura 5. 18. Radiación en onda corta y larga sobre plano horizontal medida en el Aeropuerto de Córdoba (08/07/2018).

5.4.2 Post-tratamiento de datos

Durante la campaña de medición, se tomaron un total de 381 imágenes visibles e infrarrojas. Con objeto de crear una secuencia temporal en cada una de las escenas urbanas estudiadas, se seleccionó una fotografía y termografía por ronda y punto de medición, escogiendo aquellas con un menor número de personas y/o vehículos.

Las termografías escogidas fueron calibradas en el software comercial FLIR Tools con la información ambiental registrada en la correspondiente zona de medición (temperatura del aire y humedad relativa), fijando la distancia a 0m y el valor de la emisividad en 1. Una vez ajustadas, las termografías fueron exportadas en archivos de datos tipo *.csv, que incluían 76800 valores de temperaturas (240x320 px).

A continuación, la información matricial fue procesada mediante el Script descrito en el Anexo C, para la obtención del *time-lapse* térmico de las distintas escenas urbanas. El primer paso consistió en la alineación espacial de las imágenes obtenidas a lo largo de la jornada en cada punto de medición. En este caso, se definió como imagen fija de referencia la correspondiente a la primera toma. El resto de imágenes fueron desplazadas y/o rotadas hasta quedar alineadas con dicha imagen de referencia. Una vez alineadas, las imágenes - es decir, las matrices de temperaturas-, fueron recortadas, asegurando que los píxeles contenidos dentro de los nuevos límites fueran comunes a todas las imágenes de la secuencia.

En la Figura 5. 19 se resume, para las distintas escenas estudiadas en esta campaña de medición, el número de píxeles eliminados en cada borde de las imágenes y el porcentaje de información conservada después del recorte.

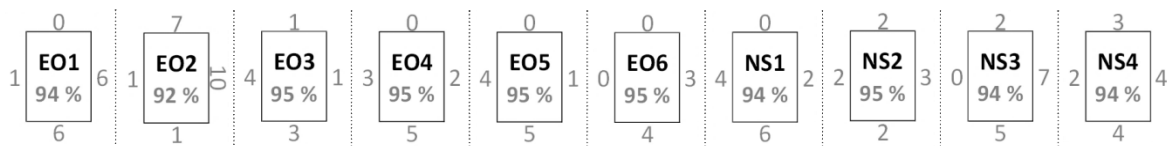


Figura 5. 19. Píxeles eliminados en los bordes de cada escena y porcentaje de información conservada sobre la contenida en la imagen de 240 x 320 px.

En nuestro caso, tras llevar a cabo el proceso de alineado y recorte, se conservó entre el 92% y el 95% de la información térmica contenida en la imagen con el tamaño original (240x320). Estos valores confirman que el procedimiento de medición propuesto permite obtener información sobre las temperaturas superficiales de un espacio urbano, a lo largo de un periodo de tiempo prolongado, de una forma ágil, y sin necesidad de mantener la cámara en una posición fija.

5.5 RESULTADOS

Como resultado de las mediciones, se obtuvieron 10 *time-lapse* de imágenes visibles e infrarrojas, compuestos por 9 tomas. Las secuencias completas realizadas desde cada localización, así como los datos ambientales usados para la calibración de las termografías, se recogen íntegramente en el Anexo B.

En este epígrafe, analizaremos en detalle un extracto de la secuencia obtenida en dos de las localizaciones estudiadas, la NS1 y la EO3, compuesto por cinco de las tomas realizadas a lo largo del día (Figura 5. 20). Las localizaciones seleccionadas presentan diferencias en cuanto a su sección transversal, su orientación y la composición del toldo en ellas instalado. Esto nos permitirá realizar un análisis comparativo sobre la distribución espacial y temporal de sus temperaturas superficiales.

5.5.1 Evolución de las temperaturas superficiales de un cañón entoldado con fachadas Este-Oeste

Antes del amanecer, las superficies urbanas de este cañón Este-Oeste estaban a una temperatura bastante homogénea y similar a la del aire. **A las 3:30h** (Figura 5. 20, izquierda), con una temperatura del aire de 25°C, las temperaturas de las superficies de la escena variaban entre 23.3°C (toldo) y 28.6°C (fachada Este). Aunque a esta hora los efectos del toldo son reducidos, es posible percibir que, en los puntos del pavimento y la fachada situados bajo el toldo, las temperaturas superficiales son 1°C y 2°C más elevadas que en zonas del mismo plano pero con mayor visión del cielo.

Con la salida del sol (04:45), las superficies orientadas a Este menos obstruidas comienzan a recibir radiación solar directa y, con ello, a calentarse. **A las 9:00h**, la parte superior de dichas fachadas se encontraba hasta 10.8°C más caliente que la inferior, cuya temperatura era similar a la del aire en ese momento (27.8°C). En estas primeras horas del día, dado que el sol incide de forma muy perpendicular al plano Este, la sombra del toldo en calles con esta orientación se proyecta sobre las plantas superiores, pero con una dimensión reducida. Así pues, la reducción de temperaturas por la presencia del toldo será de extensión limitada.

Poco a poco, el sol va tomando altura, la sombra del toldo crece y se desplaza sobre la fachada hasta alcanzar el suelo. **A las 12:00 del mediodía**, en calles con esta orientación, el toldo proyecta su sombra sobre ambas fachadas y el pavimento. No obstante, las diferencias de temperatura entre las superficies al sol y a la sombra del toldo fueron mayores en el pavimento que en las fachadas, ya que, la radiación recibida a esta hora por un plano horizontal es muy superior a la de cualquier plano vertical. **Por la tarde**, el sol incide de forma muy perpendicular a la fachada Oeste, por lo que las superficies no sombreadas empiezan a elevar su temperatura rápidamente, como se observa en las plantas superiores de la imagen de **las 15:00**. En este instante, algunas superficies al sol alcanzan los 50°C, una temperatura hasta 15°C más elevada que puntos situados a la misma altura, pero a la sombra del toldo.

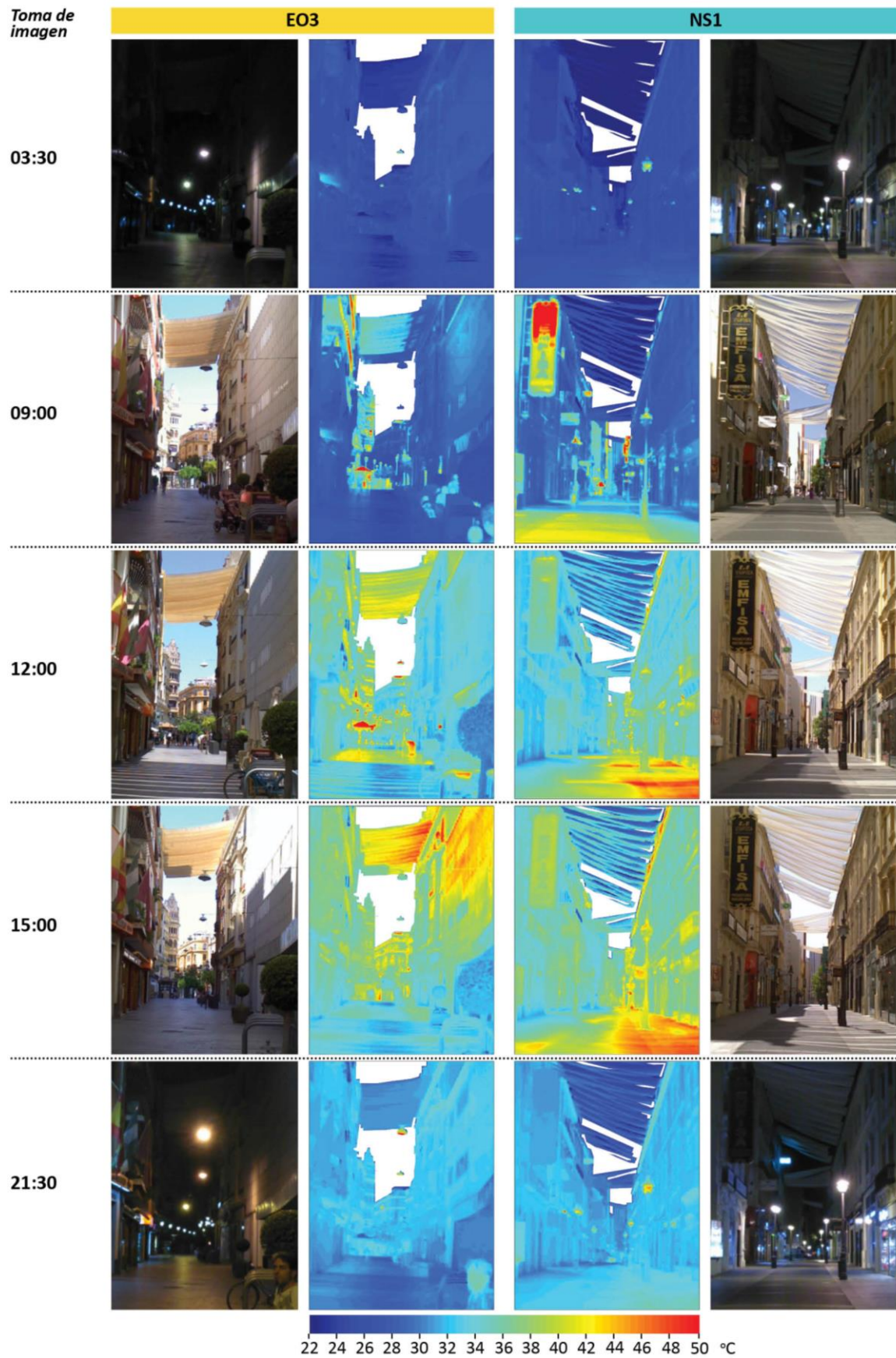


Figura 5. 20. Extracto de las secuencias de termografías y fotografías en los puntos EO3 y NS1.

Después de ponerse el sol, las superficies comienzan a enfriarse, acercándose gradualmente a la temperatura del aire. A las 21:30, dos horas después del ocaso, con el aire a 31°C, la mayoría del pavimento de esta escena urbana estaba entre los 28°C y 31°C, mientras que la mayoría de la fachada se encontraba algo más caliente, entre 30°C y 33°C, por efecto de la inercia.

5.5.2 Evolución de las temperaturas superficiales de un cañón entoldado con fachadas Norte-Sur

Antes de la salida del sol, las temperaturas de las superficies construidas del cañón Norte-Sur eran similares a la del aire. La toma de **las 3:30** (Figura 5. 20, derecha), donde la mayoría de las superficies construidas estaban entre 24°C (fachada Norte) y 29°C (pavimento), mientras el aire se encontraba a 24.5°C, ilustra esta situación. El toldo de esta escena, con una mayor perforación que el anterior, estaba en apariencia más frío que el aire, oscilando entre 17°C y 23°C. En este caso, las diferencias en la visión del cielo por la presencia del toldo generan variaciones de temperatura casi imperceptibles.

Durante las primeras horas de la mañana, el sol penetra en el cañón por su extremo Este, incidiendo de forma tangencial sobre las fachadas (primero la Norte, luego la Sur) y más perpendicularmente sobre el suelo, de color más oscuro. Como consecuencia, el pavimento comienza a elevar su temperatura más rápidamente que las superficies verticales. La imagen **de las 9:00** fue tomada en el momento en que el sol se alineaba con el eje de la calle, por lo que el sol incidía rasante a ambas fachadas y sus temperaturas aún son muy similares a las del aire en este momento. En cambio, el pavimento ya ha comenzado a sobrecalentarse y la sombra del toldo es reconocible sobre el suelo, tanto visual como térmicamente. A la sombra del toldo, el pavimento estaba a esta hora hasta 12°C más frío que en las zonas al sol.

En las horas centrales del día, el sol entraba en este cañón hasta su base, iluminando por completo la fachada Sur, como se observa en las imágenes tomadas a **las 12:00 del mediodía y a las 15:00 de la tarde**. Durante varias horas, la sombra del toldo se proyecta sobre ambas superficies, aunque con consecuencias diferenciadas sobre sus temperaturas. De manera análoga a lo que ocurría en el cañón Este-Oeste, la disminución de temperaturas generada por la presencia del toldo era más notable en el pavimento (más oscuro y que recibe mayor radiación) que en la fachada (más reflectiva y menos irradiada). Sin embargo, en esta orientación, este efecto será más prolongado en el tiempo, ya en cañones con esta orientación y sección transversal, el pavimento recibe radiación directa durante gran parte de la jornada.

Con la llegada de la noche, las superficies comienzan a enfriarse, aproximándose gradualmente a la temperatura del aire. A las 21:30, dos horas después del atardecer, las temperaturas de las fachadas de esta escena urbana oscilaban entre 30°C (fachada Norte) y 34°C (fachada Sur), lo que suponía una diferencia con el aire de entre -1°C y +2.5°C. En este caso, el pavimento permanecía algo más caliente que las fachadas, oscilando entre 31°C y 35°C, a consecuencia de la mayor radiación absorbida durante el día y de los efectos de la inercia.

5.6 DISCUSIÓN

Con el objeto de evaluar los efectos térmicos generados por el toldo en un entorno urbano real, hemos analizado los resultados de la medición desde una perspectiva cualitativa-cuantitativa, centrandó la discusión en dos aspectos:

- Discusión del efecto del toldo según la **orientación de la calle**
 - Sobre el pavimento
 - Sobre la fachada
- Discusión del efecto del toldo según sus **características materiales**
 - Sobre la temperatura del propio toldo
 - Sobre la temperatura de las superficies urbanas

5.6.1 Discusión del efecto del toldo sobre las temperaturas superficiales según la orientación

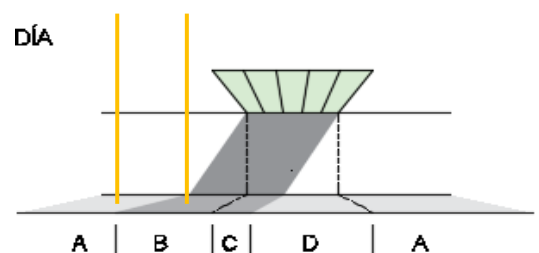
[Sobre el pavimento]

En este epígrafe, estudiaremos la influencia del toldo sobre las temperaturas del pavimento en función de la orientación de la calle, basándonos en la información obtenida de las termografías.

Para ello se han seleccionado **dos zonas de medición con diferente orientación, EO123 y NS34**. Ambas áreas urbanas poseen el mismo pavimento y las características materiales de su entoldado son similares en cuanto a su nivel de obstrucción solar (65% en EO123 y mayoritariamente de 69% en NS34). Este hecho nos permitirá realizar comparaciones de la efectividad del toldo en función de la orientación, dejando a un lado las variables materiales.

En primer lugar, se ha realizado una simulación de la radiación directa incidente sobre el pavimento, con y sin toldo, durante el día de la medición en las dos áreas urbanas seleccionadas. Dicho análisis, realizado sobre un modelo 3D morfológico de la zona, ha permitido reflexionar sobre el movimiento y duración de la sombra sobre el plano horizontal, en este contexto urbano específico. Las conclusiones obtenidas han guiado la selección de las escenas donde se estudiarán las temperaturas superficiales: una en **cañón con fachadas Este-Oeste (EO2)**; otra, en una calle con **fachadas Norte-Sur (NS3)**.

El efecto del toldo sobre el pavimento se cuantificará comparando las temperaturas de puntos expuestos al sol (zona A) con puntos a la sombra del toldo, bien bajo él (zona B), bien, fuera del mismo (zona C). En estos últimos es donde se esperan las máximas diferencias de temperatura, ya que su balance radiativo será menor: menor absorción de radiación en ondas cortas que en A, por estar a la sombra; enfriamiento radiativo hacia el cielo similar al de A.



Efecto del toldo sobre el pavimento en cañones con fachadas Este-Oeste

En cañones compactos con esta orientación, la sombra que el toldo produce sobre el suelo se mueve transversalmente al eje de la calle. Durante el verano, cuando el sol está muy alto, el tamaño de la sombra sobre el suelo coincide en gran medida con la proyección horizontal del mismo, pero desplazada hacia el Norte, más cuanto mayor sea la altura de colocación de elemento textil. Este comportamiento queda ilustrado en la Figura 5. 21, donde se contrapone la radiación solar directa que recibiría el pavimento si no existiese el toldo, frente a la que recibiría si el toldo instalado contase con una opacidad del 100%.

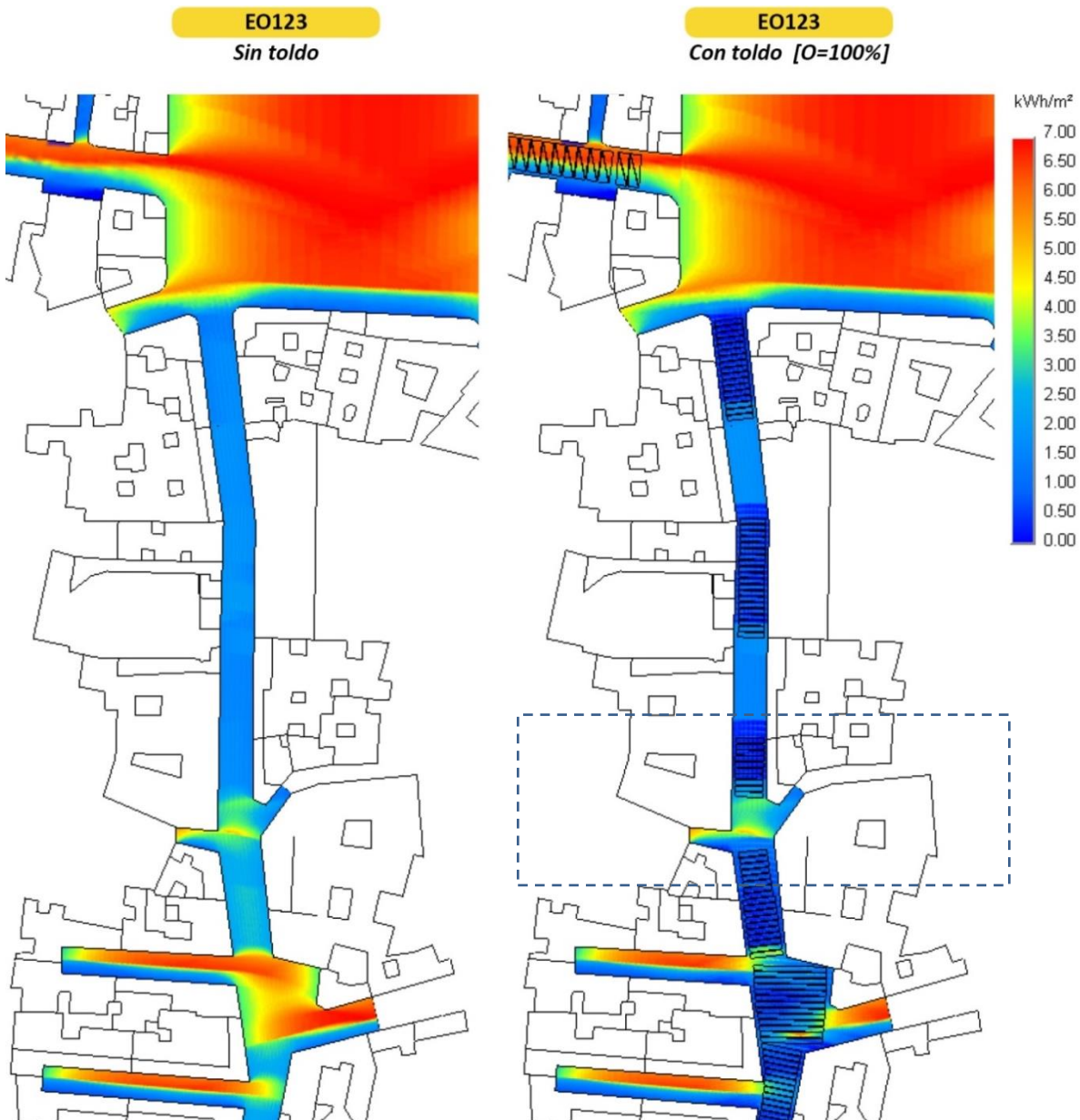


Figura 5. 21. Radiación solar sobre el pavimento de la zona EO123 el día 08 de Julio (kWh/m^2 día). Simulación realizada en HELIODON 2, teniendo en cuenta sólo la componente directa bajo condiciones de cielo despejado.

En el interior del cañón, debido a la notable oclusión del entorno urbano, la radiación incidente sobre el pavimento es aproximadamente un tercio de la que recibiría el mismo plano horizontal pero sin obstrucción (7.1 kWh/m^2). Cuando el toldo está instalado, éste genera una reducción de la radiación que afecta a una extensión similar a la ocupada por el toldo. En las intersecciones entre calles y en los ensanchamientos, la radiación recibida por el pavimento se ve incrementada, haciendo el efecto del toldo más notable.

El recorrido de la mancha solar expuesto anteriormente tiene su reflejo sobre la temperatura superficial del pavimento, como se ejemplifica en la Figura 5. 22. En ella se presentan las únicas tres tomas en las que el pavimento de la escena EO2 recibía radiación solar directa. Observamos que, entre las 11:00 y las 13:00, la sombra del toldo de las imágenes visibles coincide con un área fría en las termografías. Se aprecia que las diferencias de temperatura a la sombra (del toldo o del edificio), son poco significativas. Por el contrario, las encontradas dentro de las zonas al sol son más notables, estando el pavimento cercano al cruce más caliente que en el interior del cañón.

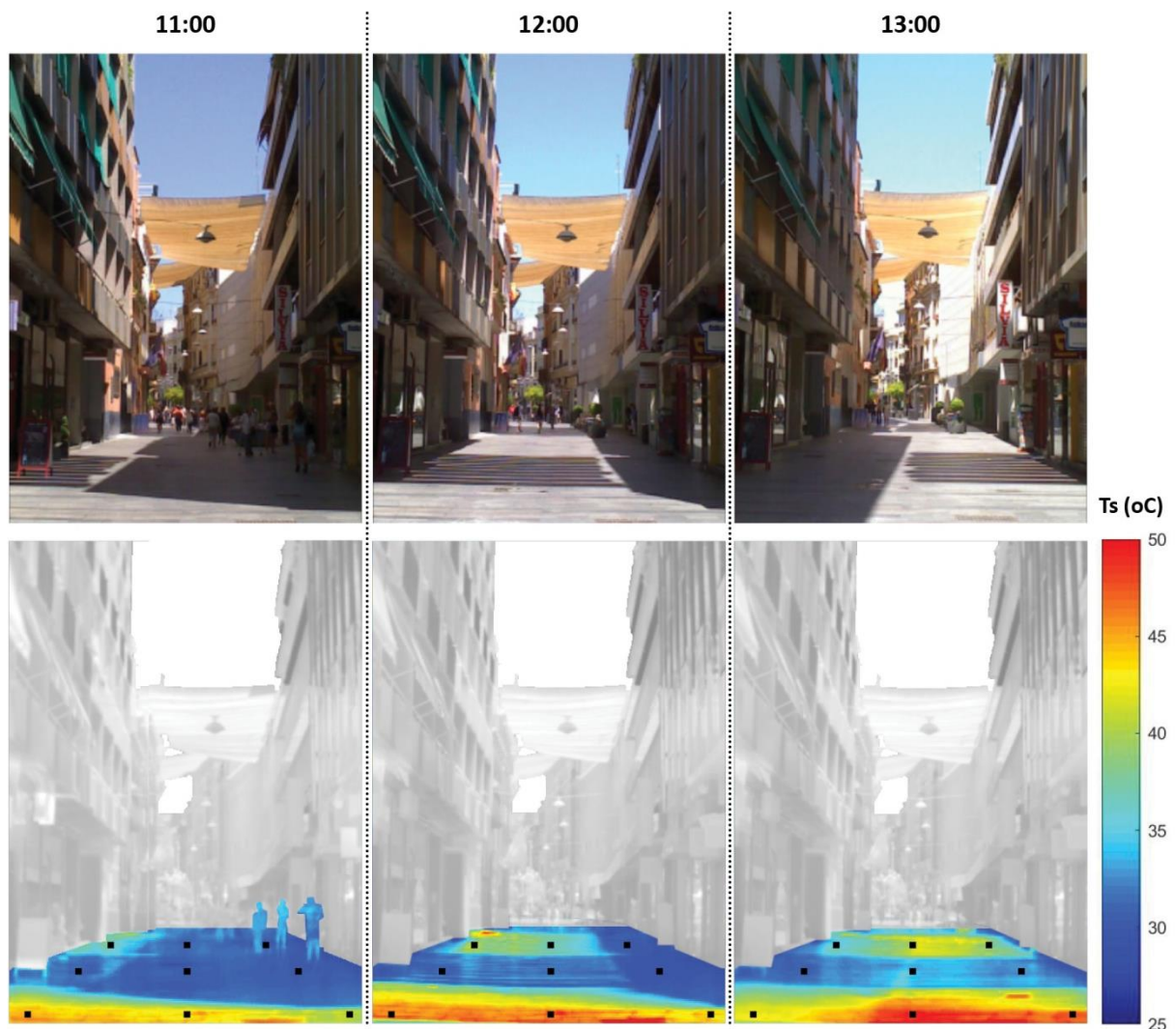


Figura 5. 22. Temperatura del pavimento en la escena EO2 entre las 11:00 y las 13:00 ST.

Para cuantificar el efecto del toldo sobre el pavimento en cañones Este-Oeste, se compararon temperaturas de puntos de la escena urbana EO2 que recibían sol directo con aquellos que estaban a la sombra del toldo en todo momento. Los puntos seleccionados se ubicaron junto a las fachadas Este (E) y Oeste (O), y sobre el eje central de la calle (C). En la Figura 5. 23 se muestran las obstrucciones solares y de visión de la bóveda celeste en esta última posición, a modo de ejemplo.

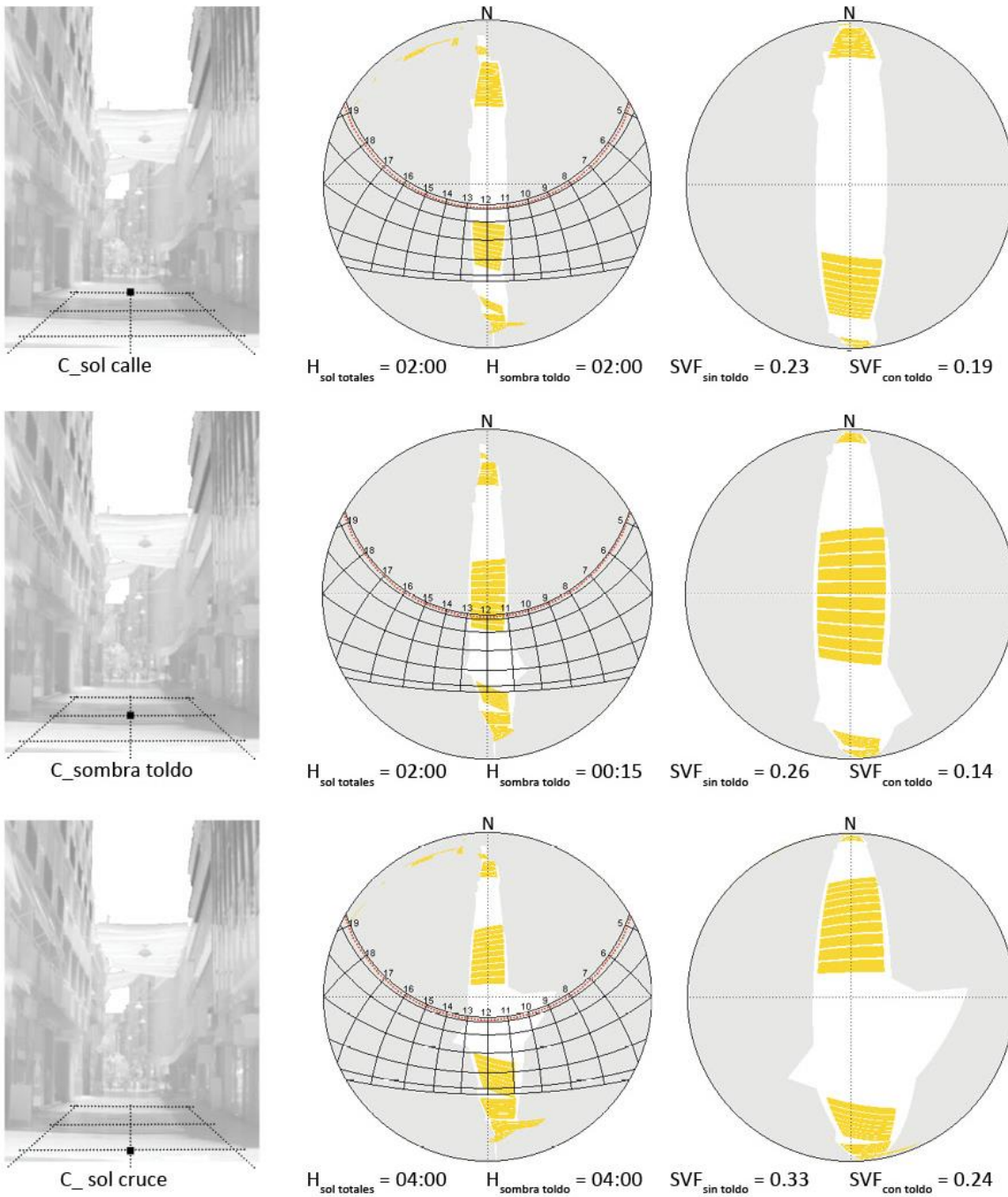


Figura 5. 23. Puntos del pavimento de la escena EO2 seleccionados sobre el eje de la calle.

Por un lado, se ha comparado la temperatura superficial de puntos dentro de la calle, situados a la sombra del toldo (E_toldo, O_toldo, C_toldo), con puntos exteriores a la misma (E_calle, O_calle, C_calle). Los resultados obtenidos se muestran en el gráfico superior de la Figura 5. 24. En él, vemos cómo los puntos a la sombra del toldo se encuentran más fríos que aquellos que no lo están, y que dicho efecto se mantiene durante toda la jornada e independientemente de su posición con respecto a la fachada (centrada o cercana a las fachadas).

Dentro del cañón, la diferencia de temperatura entre los puntos que reciben la sombra del toldo y los que no (Figura 5. 24, abajo) es mayor cuando éstos reciben radiación directa, llegando a ser de hasta 8°C a las 13:00 (una hora después de que se produzca el máximo flujo solar incidente sobre el plano horizontal). Una vez que el pavimento deja de recibir sol directo, su temperatura desciende notablemente, hasta alcanzar su mínimo antes del amanecer, al igual que ocurre con las diferencias térmicas entre los puntos.

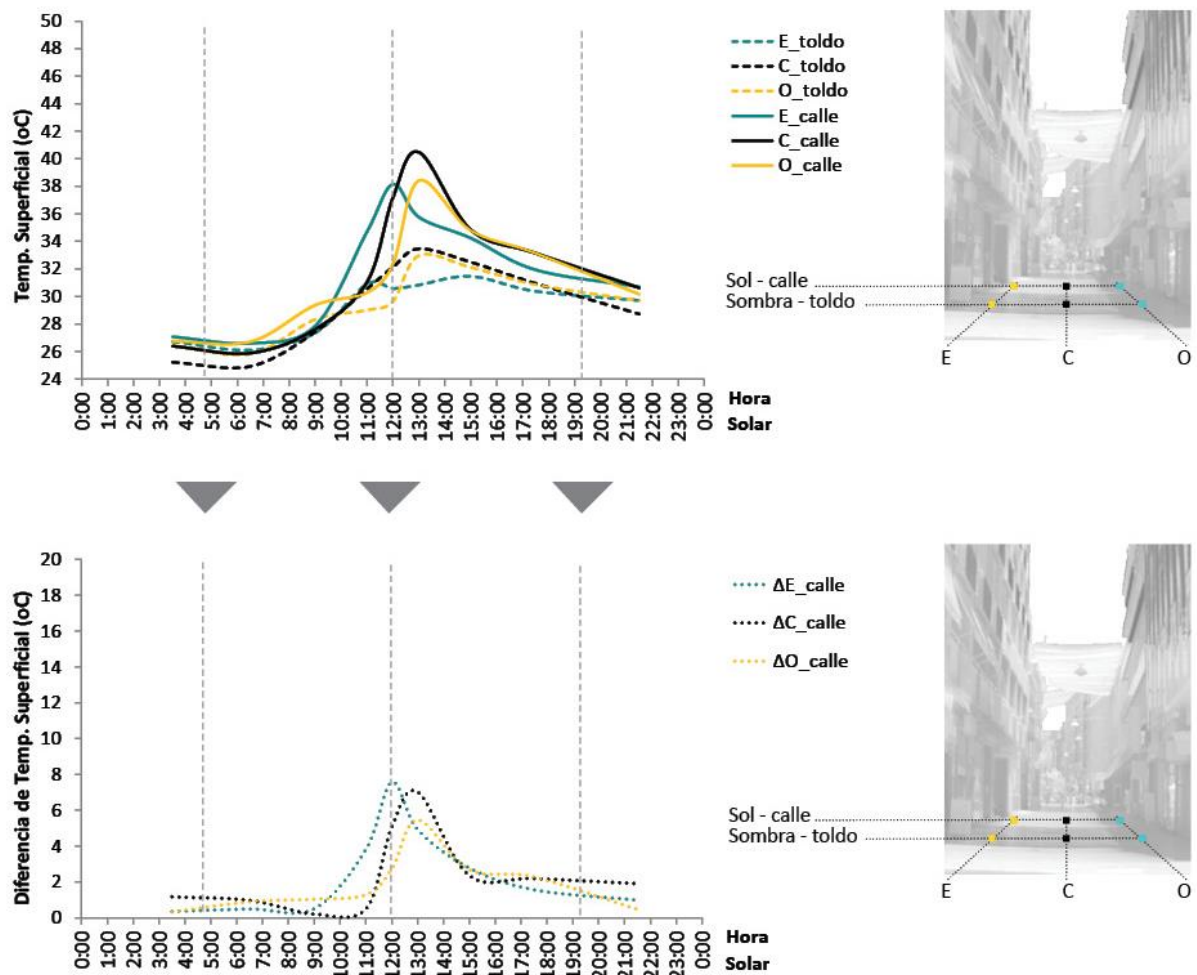


Figura 5. 24. Evolución de la Temperatura superficial aparente de puntos seleccionados del pavimento de la escena EO2 (arriba). Diferencia de temperatura entre los puntos al sol en la calle y la sombra (abajo)

Por otro lado, se ha comparado la temperatura de los puntos a la sombra del toldo en el interior del cañón (E_toldo, O_toldo, C_toldo) con otros situados a la altura de uno de los cruces de calles (E_cruce, O_cruce, C_cruce). Como se muestra en la Figura 5.25 (arriba), éstos últimos presentaron temperaturas superficiales de hasta 48°C, valores notablemente superiores a los alcanzados en el interior del cañón ($\approx 8^\circ\text{C}$ más). Este comportamiento de las temperaturas superficiales se explica por el hecho de que los puntos situados en el cruce reciben radiación directa durante el doble de tiempo que los interiores al cañón (Figura 5. 23).

En este caso, la diferencia de temperatura sol vs sombra del toldo es mayor en valor absoluto, de hasta 16°C , y dicho efecto se prolonga más en el tiempo que en el interior del cañón (Figura 5.25 abajo). Estos resultados demuestran que, en cañones Este-Oeste, el toldo tendrá un efecto más positivo sobre el pavimento cuanto menor sea la oclusión del entorno, es decir, cuanto mayor sea la sección W/H del cañón o donde existan intersecciones o ensanchamientos en la sección del mismo.

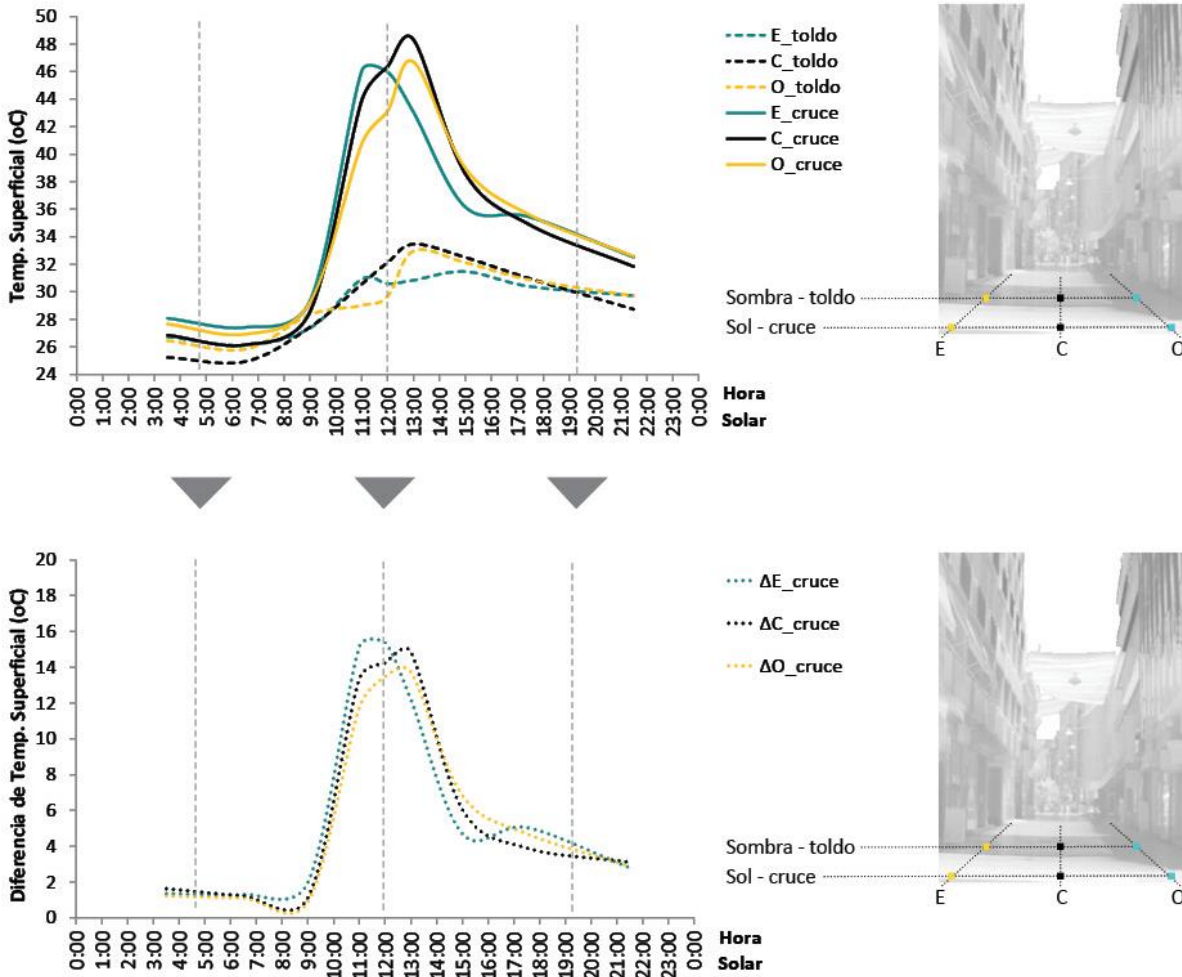


Figura 5. 25. Evolución de la Temperatura superficial aparente de puntos seleccionados del pavimento de la escena EO2 (arriba). Diferencia de temperatura entre los puntos al sol en el cruce y la sombra (abajo)

Efecto del toldo sobre el pavimento en cañones con fachadas Norte-Sur

En este cañón Norte-Sur, el pavimento situado al pie de la fachada Sur recibe radiación directa durante gran parte de la jornada, mientras que la zona cercana a la fachada Norte permanece en sombra la mayoría del tiempo (Figura 5. 26). En el caso de existir un toldo 100% opaco, éste reduciría de manera muy significativa la radiación recibida por la zona de pavimento cercana a la fachada Sur. Las simulaciones muestran también que la sombra del toldo afecta a una mayor extensión que en los cañones Este-Oeste, ya que a primera y última hora del día sombrea zonas muy alejadas del mismo (véase la disminución de radiación en el cruce situado al Este).

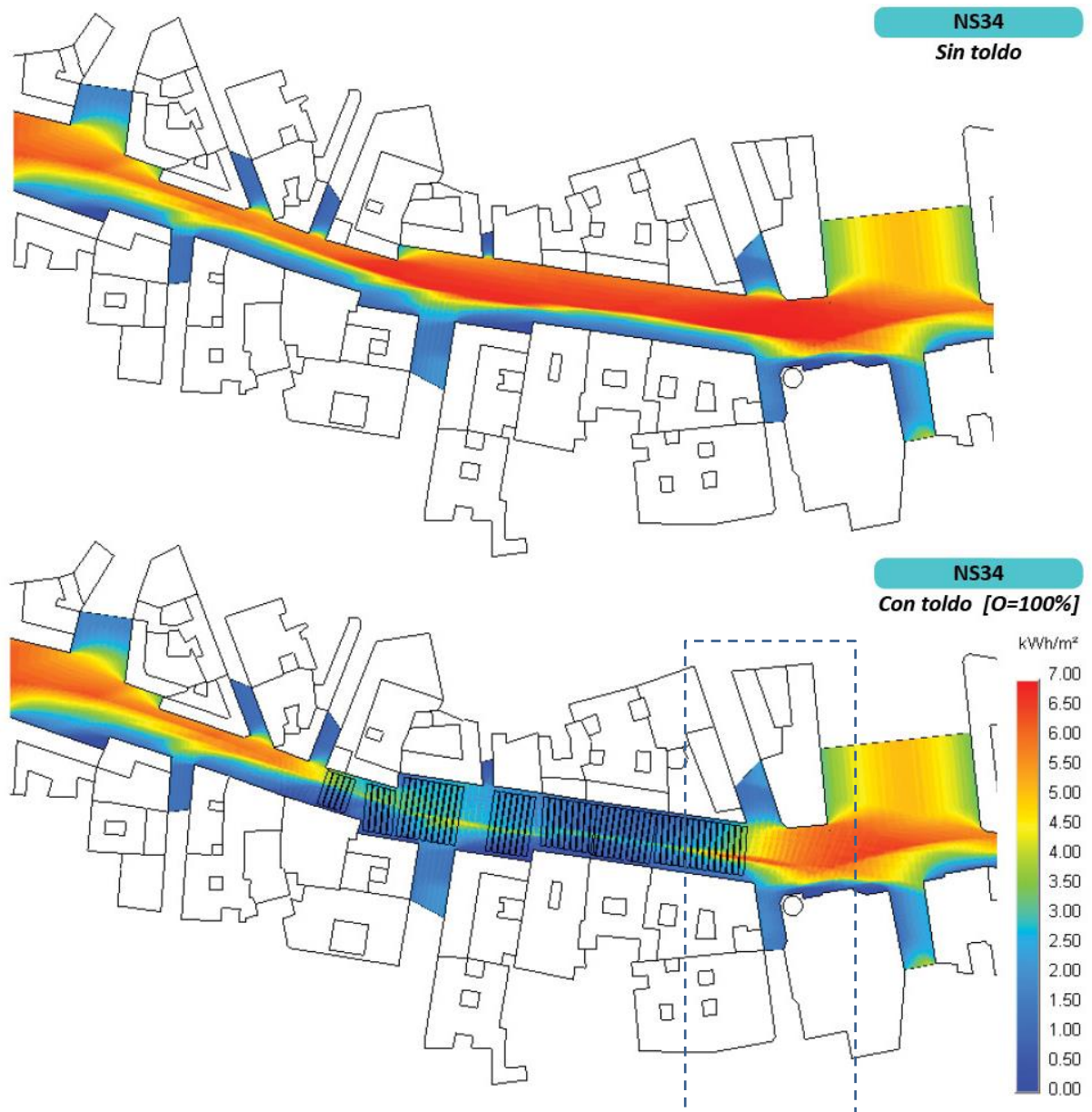


Figura 5. 26. Radiación solar sobre el pavimento de la zona NS34 con y sin toldo el día 08 de Julio (kWh/m^2 día). Simulación en HELIODON 2, considerando sólo la componente directa, un cielo despejado y un toldo con una obstrucción del 100%.

Para estudiar la influencia del toldo sobre el pavimento de un cañón Norte-Sur, se ha escogido la escena NS3, donde aparece la zona de interés identificada a partir del estudio de radiación presentado en la Figura 5. 26.

En las imágenes visibles y termográficas seleccionadas de la escena NS3 (Figura 5. 27), se observa cómo, durante las horas centrales del día, la sombra del toldo avanza sobre el pavimento en paralelo a la fachada Sur. Como se muestra en la toma de las 11:00 y las 13:00, el pavimento sombreado por el toldo eleva menos su temperatura que las áreas soleadas, estando más próxima a la que se registra a la sombra del edificio. Al principio y al final del día, como se percibe en la toma de las 17:30, el toldo proyecta su sombra sobre la fachada Norte y el pavimento más próximo a ésta, a una mayor distancia del toldo, evitando el sobrecalentamiento de zonas más cercanas al cruce.

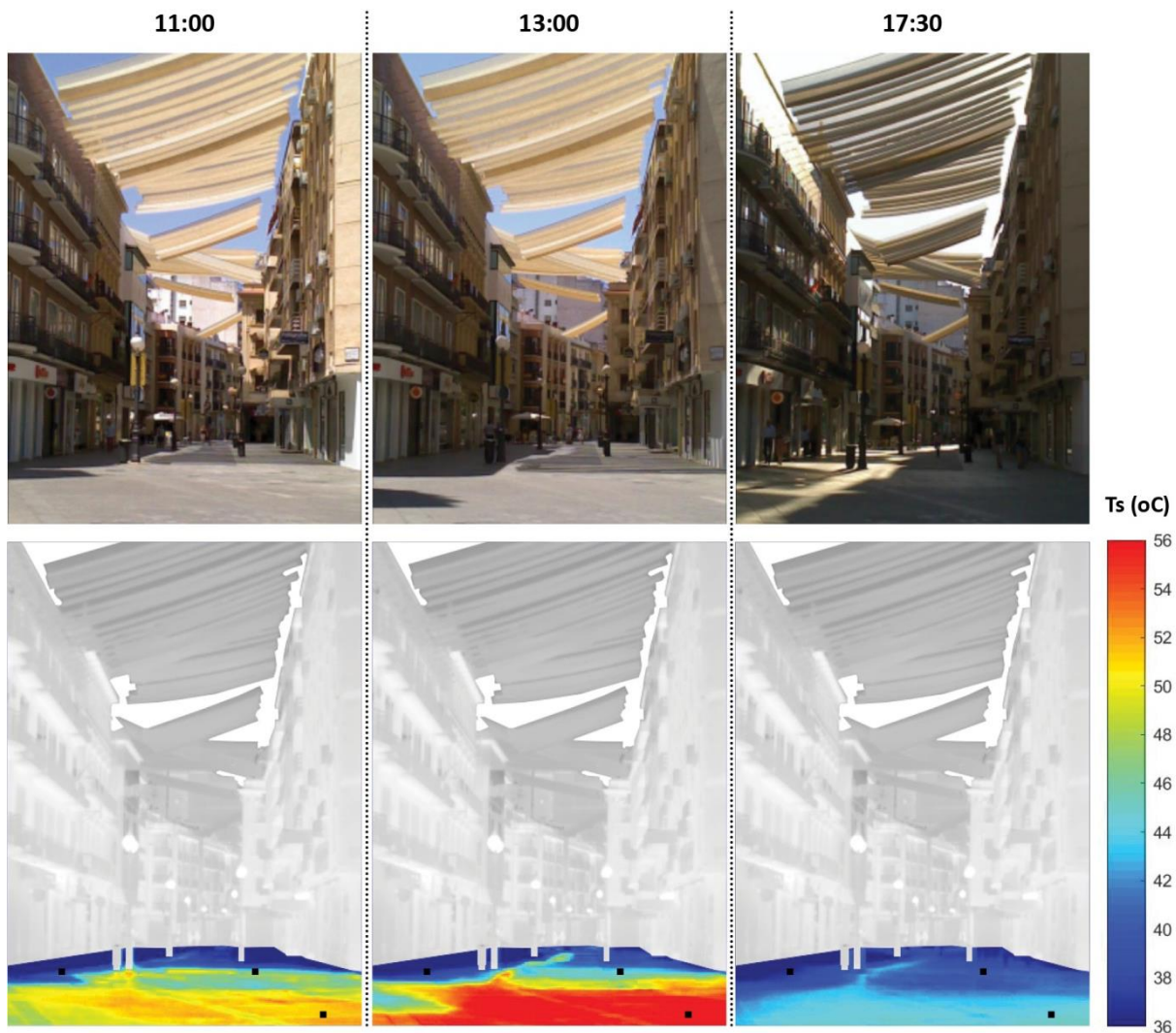


Figura 5. 27. Temperatura del pavimento en NS3 en los puntos de estudio seleccionados a las 11:00, 13:00 y 17:30 HS.

En el caso del cañón Norte-Sur, el efecto del toldo sobre el pavimento se analizó en los tres puntos de la escena NS3 indicados en la Figura 5. 28. Dos de los puntos se sitúan junto a la fachada Sur: uno de ellos se encuentra mayoritariamente a la sombra del toldo (S_toldo), mientras que el localizado en la intersección recibe radiación solar directa durante gran parte de la jornada (S_cruce). El tercer punto (N_edif), localizado junto a la fachada Norte permanece casi todo el día a la sombra de la edificación más próxima (excepto algunas horas de la mañana y de la tarde).

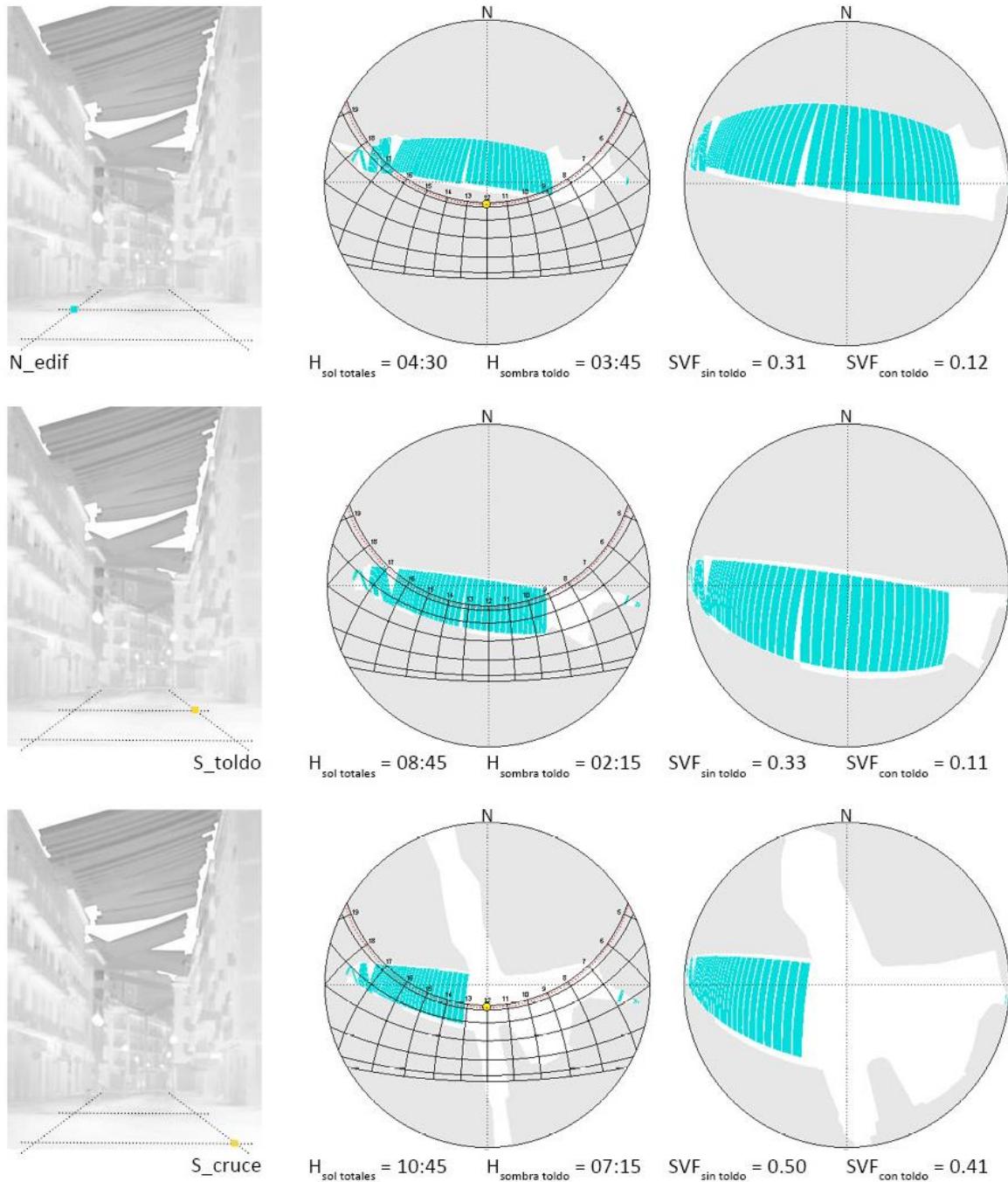


Figura 5. 28. Puntos del pavimento estudiados en la escena NS3.

La evolución de las temperaturas superficiales de estos puntos se representa en Figura 5. 29. Los resultados muestran que el punto situado en el cruce (S_cruce), más expuesto a la radiación solar, registró las temperaturas más elevadas durante toda la jornada, que oscilaron entre 29°C y 55°C (Figura 5. 29 arriba). Las diferencias de temperatura entre este punto y los puntos sombreados por el toldo y los edificios (S_toldo y N_edif, respectivamente), fueron más importantes de 1 a 3 horas después del máximo en la radiación sobre plano horizontal (Figura 5. 29, abajo). Así, gracias a la sombra del toldo, la temperatura máxima en el punto S_toldo fue de 44°C (15:30), 12°C más baja que la máxima en el punto S_cruce. Las temperaturas más bajas se encontraron en N_edif, a la sombra de la edificación durante casi toda la jornada, aunque siempre fueron superiores a las del aire.

A pesar de que tanto N_edif como S_toldo estuvieron gran parte de la jornada a la sombra, entre ellos existieron diferencias significativas de temperatura (en S_toldo hasta 7°C más que en N_edif). Esta diferencia de temperatura refleja la posible gradación térmica que puede existir dentro de superficies a la sombra y recalca la importancia del nivel de obstrucción solar del toldo.

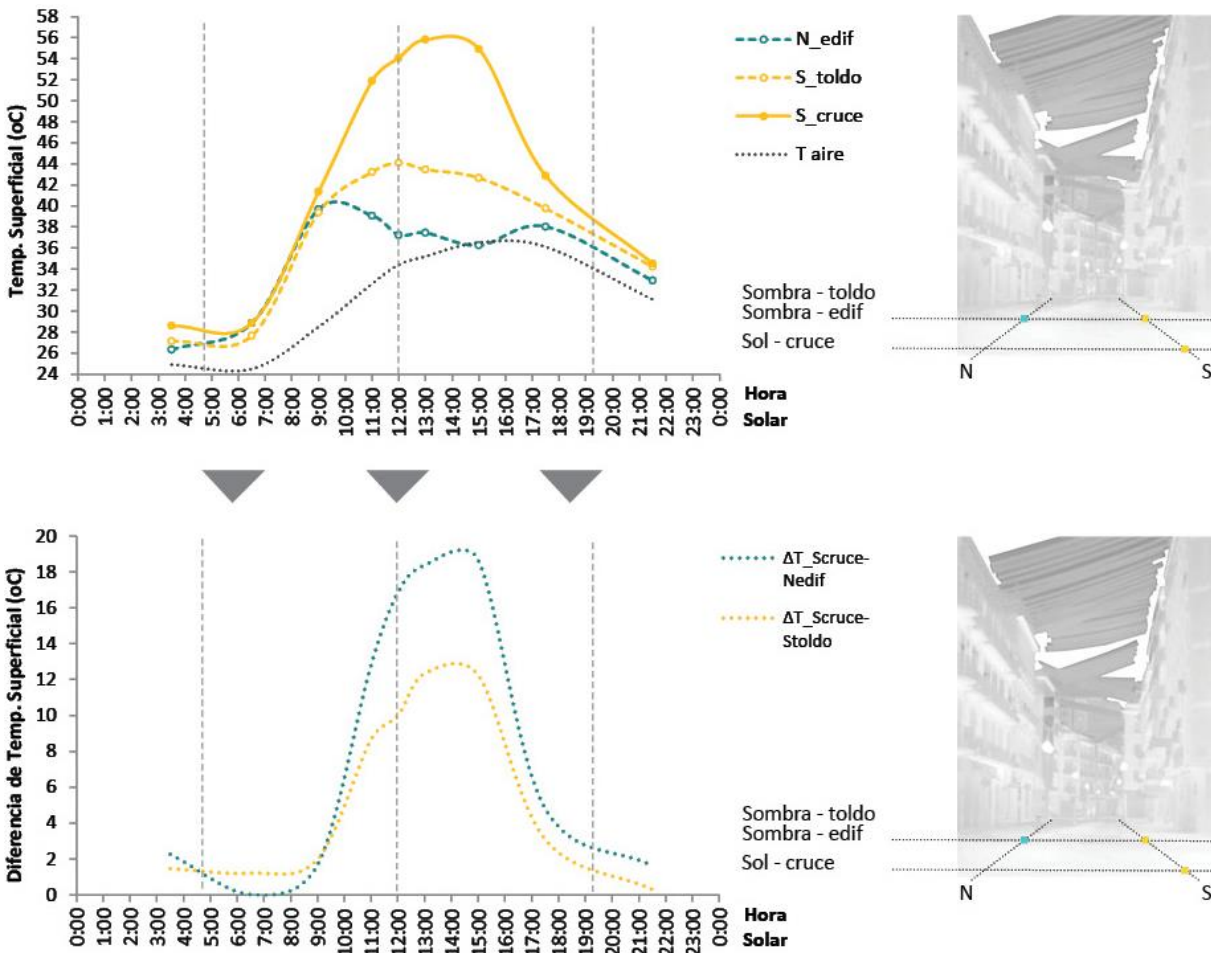


Figura 5. 29. Evolución de la Temperatura superficial aparente de puntos seleccionados del pavimento de la escena NS3 (arriba). Diferencia de temperatura entre los puntos al sol y la sombra (abajo)

[Efecto del toldo sobre las fachadas]

Para evaluar el efecto del toldo sobre las fachadas, se realizó un estudio previo sobre la **radiación solar directa incidente** en dos áreas de estudio con diferente orientación: NS34 y ES123 (Figura 5. 31, Figura 5. 32). El análisis se realizó sin toldos (izquierda), y con los toldos actualmente instalados, si su opacidad fuese del 100% (derecha).

Según los resultados de las simulaciones sin toldo, las superficies sobre las que incide más radiación (acumulada e instantánea, Figura 5. 30) coinciden con las plazas y la parte superior de las fachadas Este y Oeste del cañón. Sin embargo, en estas últimas, la radiación se distribuye de manera heterogénea, con notables diferencias entre las plantas superiores e inferiores, variando entre 0.3 y 2.7 kWh/m². En cambio, en las fachadas Norte y Sur, la distribución de la radiación es más uniforme, oscilando entre 0.9 y 1.6 kWh/m² en la Sur y, entre 0.1 y 0.8 kWh/m², en la Norte.

Las simulaciones muestran que el toldo tiene efectos diferenciados según la orientación, tanto en magnitud como en alcance espacial. En las fachadas Este y Oeste, la sombra del toldo reduce la radiación de forma significativa en términos absolutos, pero sobre una parte de la fachada de extensión limitada. Mientras que, en la Sur, el efecto positivo del toldo tiene un mayor alcance espacial, afectando a la totalidad de la fachada en altura. La disminución de la radiación incidente será, sin embargo, menor que en el caso de las fachadas Este /Oeste.

En las fachadas Este y Oeste, la sombra se desplaza poco sobre la fachada, como se deduce del hecho de que las divisiones entre las piezas, huecos por donde pasan los rayos solares, son perceptibles en la distribución de la radiación sobre las superficies. Por el contrario, en las fachadas Norte y Sur, la sombra se desplaza en mayor medida y este patrón no es reconocible.

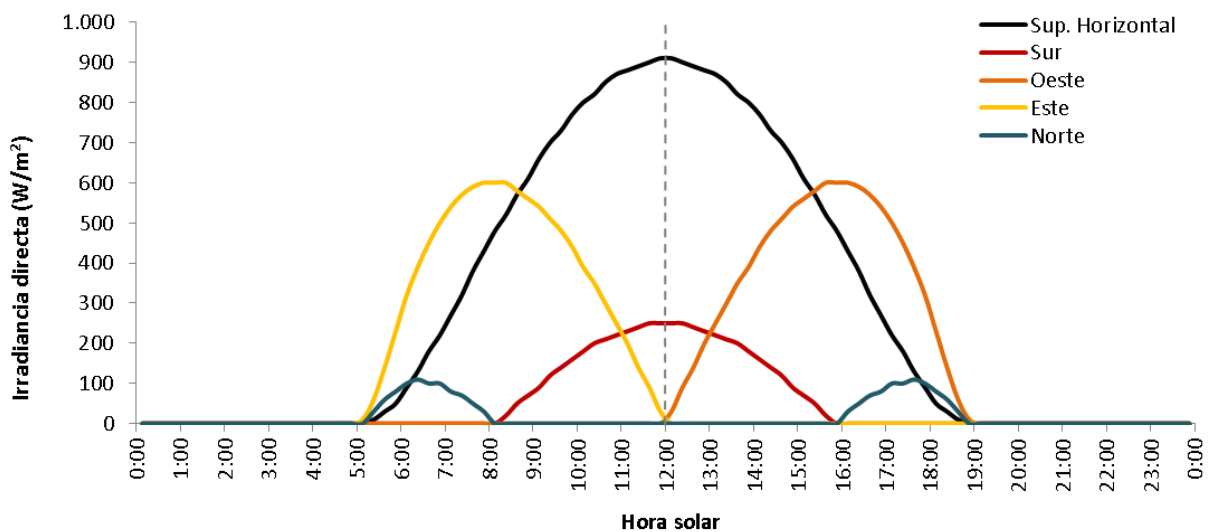


Figura 5. 30. Irradiación directa simulada en HELIODON 2 para el 8 Julio bajo condiciones de cielo despejado (W/m²) para superficies verticales y horizontales sin obstrucciones.

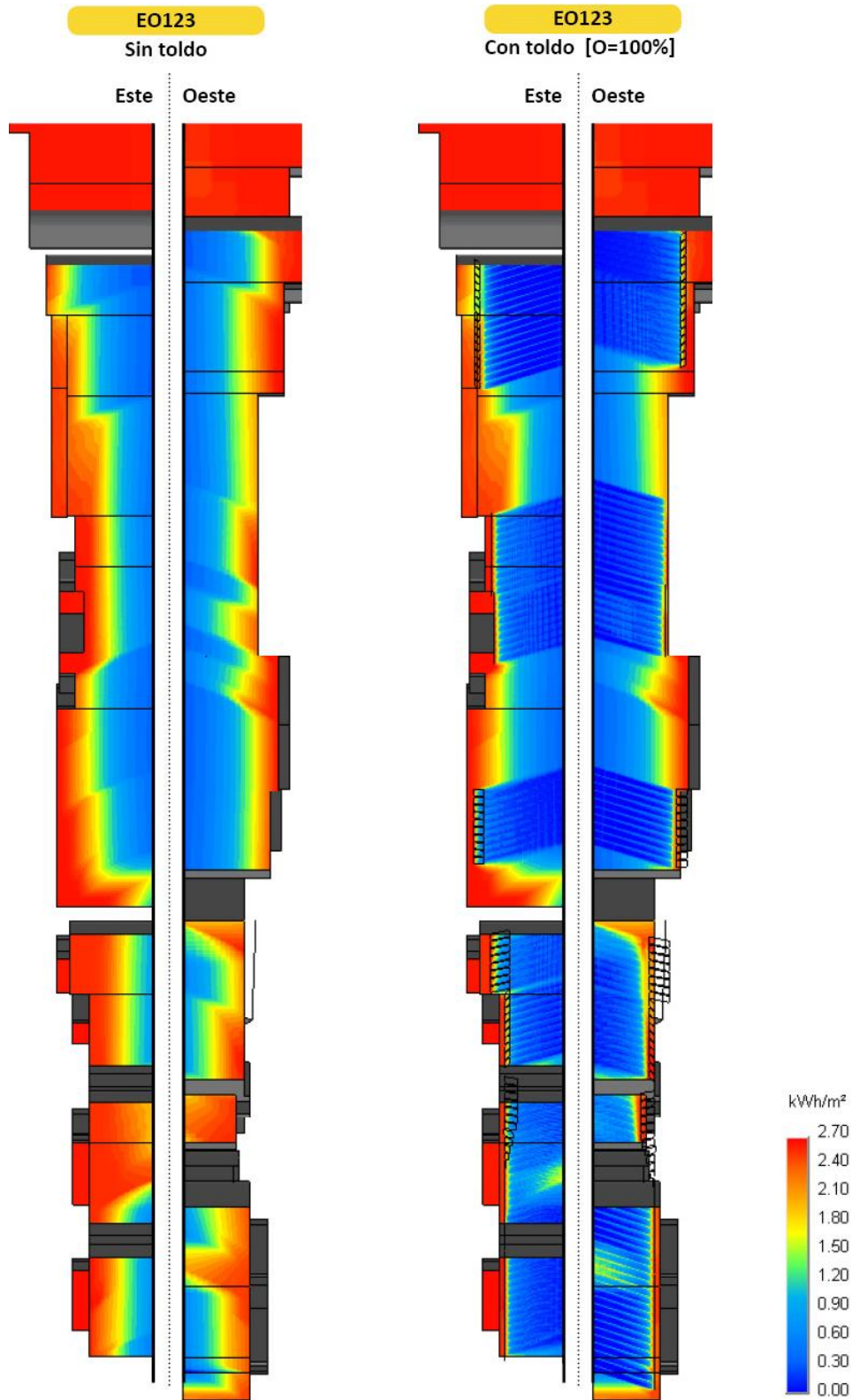


Figura 5. 31. Radiación solar con y sin toldo sobre las fachadas Este y Oeste de la zona EO123 el día 08 de Julio (kWh/m² día). Simulación en HELIODON 2, considerando sólo la componente directa, cielo despejado y un toldo de obstrucción del 100%.

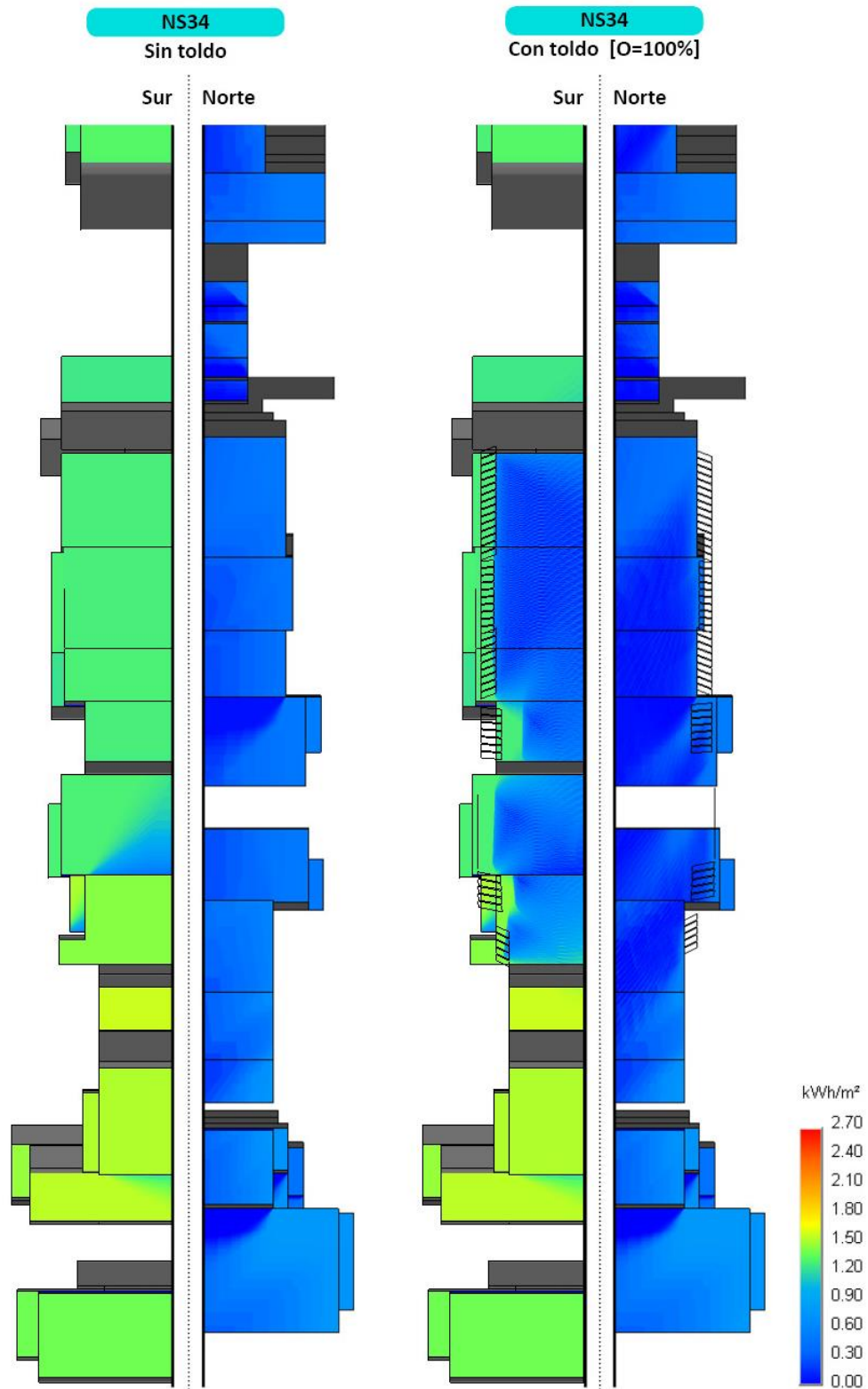


Figura 5. 32. Radiación solar con y sin toldo sobre las fachadas Norte y Sur de la zona NS34 el día 08 de Julio (kWh/m^2 día). Simulación en HELIODON 2, considerando sólo la componente directa, un cielo despejado y toldo de obstrucción del 100%.

Las temperaturas que alcanzan las fachadas son consecuencia no sólo de la radiación incidente sobre ellas, mostrada anteriormente, sino de la capacidad que éstas tienen para absorberla (coeficiente de reflexión) y almacenarla (inercia térmica). En general, las fachadas de este entorno urbano tienen una reflectividad media-alta. Por ello, las diferencias de temperatura esperables entre las zonas al sol y la sombra del toldo deberían ser menores que las que pueden alcanzarse en el pavimento.

Las máximas temperaturas esperables en fachada, así como las mayores diferencias entre zonas al sol y la sombra del toldo, se producirán coincidiendo con los momentos en los que el flujo solar incidente sobre dicho plano es máximo. Como hemos visto, en esta época del año, las fachadas Este y Oeste son los planos sobre los cuales incide un mayor flujo solar, por lo que nos hemos centrado en una escena con esta orientación para cuantificar los efectos del toldo sobre la fachada.

Efecto del toldo sobre Fachada EO

En este epígrafe, estudiaremos el efecto del toldo sobre la fachada Oeste en la escena EO2. Para ello, hemos seleccionado el edificio comercial terciario de cuatro plantas de altura indicado en la Figura 5.33. En planta baja, la fachada de esta edificación está ocupada por escaparates de vidrio laminado con lámina de PVB blanca. El resto de plantas están acabadas con un aplacado continuo de hormigón gris claro (coeficiente de reflexión $r = 0.5$). El edificio tiene un frente de fachada de 50m de longitud, de los cuales 27 están cubiertos por un toldo.

Esta última característica resulta especialmente interesante para nuestro estudio, ya que posibilita la comparación entre las temperaturas de dos superficies materialmente idénticas, pero expuestas a dos situaciones radiativas diferentes: una bajo el toldo, otra fuera de él.

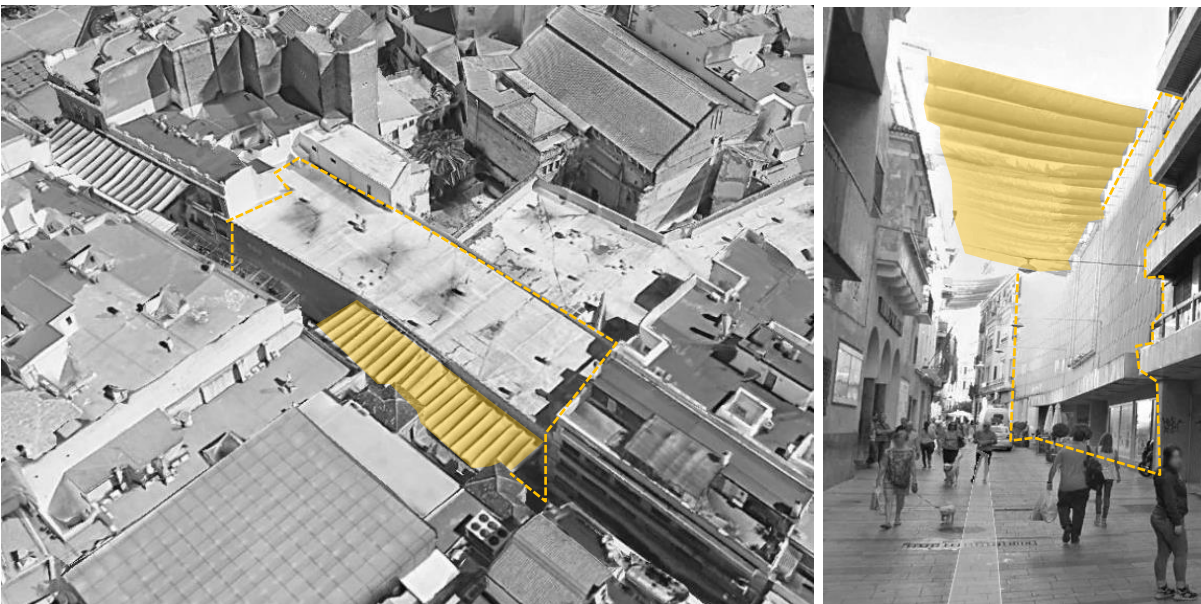


Figura 5.33. Edificio de estudio en la calle Jesús y María (Fuente: Propia a partir de Google Earth Pro).

En la Figura 5. 34, se muestra la fotografía de la escena urbana EO2 tomada a las 15:00h, acompañada de la termografía de la zona de la fachada Oeste y del toldo en ese mismo instante.

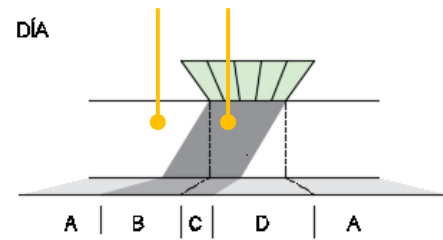
Como anticipaban las simulaciones, las temperaturas más elevadas del edificio se localizan en la parte superior de la fachada, mientras que las áreas de fachada más frías se sitúan en la planta baja, coincidiendo con el soportal, que permaneció continuamente a la sombra. En este edificio, las temperaturas de fachada varían entre los 32°C registrados en el interior del soportal (2°C por encima del aire a esa hora) y los 44°C de última planta, que recibe radiación solar directa. Esto evidencia la variabilidad de cargas térmicas que puede experimentar un mismo edificio y la importancia de la geometría urbana.

La sombra del toldo visible en la fotografía se traduce en diferencias notables de temperatura en la termografía, que llegan a ser de 6°C. Se observa que, en la dirección horizontal, la línea sol-sombra es clara. En cambio, en la vertical, esta división es más difusa, reflejo de un recorrido solar con mayores variaciones en esta dirección. Otro aspecto interesante que se detecta en la termografía es la elevada temperatura de las partes del toldo que reciben radiación. Aquí se evidencia que el toldo evita que las fachadas eleven su temperatura, a costa de calentarse él mismo. En nuestro caso, la temperatura que este dispositivo alcanza es similar a las de las fachadas al sol, lo que supone un notable diferencial con respecto a la temperatura del cielo que modifica significativamente la escena radiativa.



Figura 5. 34. Fotografía y termografía de la fachada Oeste y del toldo de la escena urbana EO2 a las 15:00h, indicando el edificio y los puntos de análisis.

A continuación, se han analizado las temperaturas en las dos zonas de fachada indicadas en la Figura 5. 34, ambas con la misma superficie y obstrucciones solares similares. Sin embargo, una de ellas se encuentra bajo el toldo y afectada por su sombra (situación C), mientras que la otra está fuera del área de influencia del mismo durante toda la jornada (situación B).



La evolución de las temperaturas superficiales en estas áreas de interés a lo largo de la jornada se ha representado en la Figura 5. 35. Los resultados muestran que, las temperaturas superficiales más elevadas se alcanzan en la zona ubicada fuera del toldo en la toma de las 15:00h (44°C), hasta 6°C más altas que las registradas debajo del toldo en ese momento (38°C). Éste fue el mayor diferencial de temperatura registrado entre los puntos de estudio, que se produjo coincidiendo con el momento en el que el plano de fachada recibía la máxima radiación directa.

Sin embargo, durante una parte significativa de la jornada (5 de las 9 tomas), la superficie situada bajo el toldo mostró temperaturas ligeramente superiores a las de la zona fuera de él. En este sentido, la máxima diferencia se registró a última hora de la noche, antes del amanecer, momento en que la zona bajo el toldo se encontraba aproximadamente 1° más caliente que la situada fuera de él. Esta diferencia de temperatura puede explicarse por la reducción del enfriamiento radiativo debida a la obstrucción de la visión del cielo generada por el toldo. Aunque su magnitud sea reducida, se trata de un efecto prolongado en el tiempo y señala que el efecto positivo del toldo se vería incrementado si se retirase por la noche.

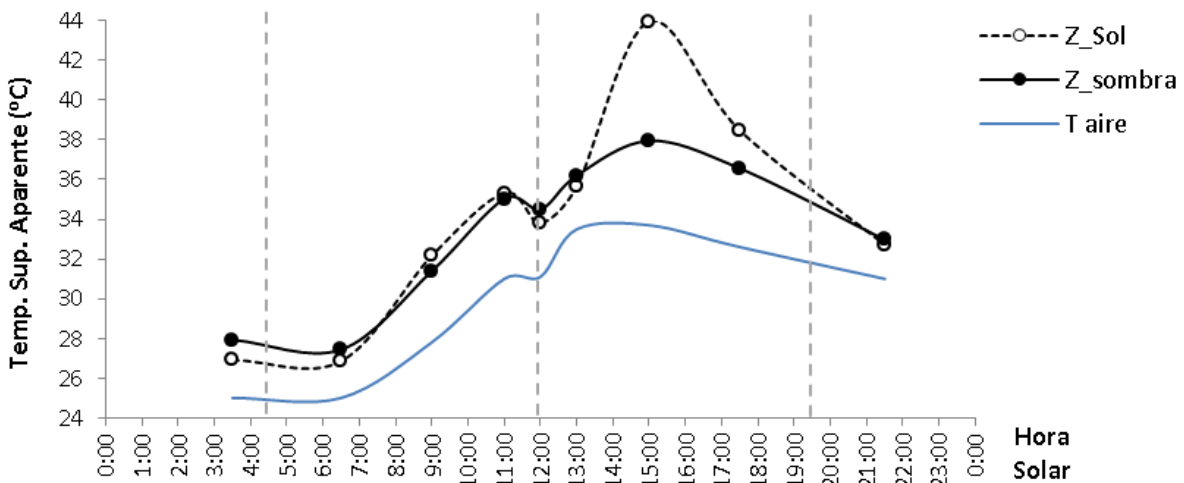


Figura 5. 35. Evolución de las temperaturas superficiales de puntos al sol y la sombra del toldo en la fachada Oeste de la escena urbana EO2.

5.6.2 Discusión del efecto del toldo sobre las temperaturas superficiales según su materialidad

En este epígrafe se discutirá la influencia de las características del toldo sobre su propia temperatura y la de las superficies que éste sombrea. Para ello, hemos seleccionado tres escenas urbanas: EO4, NS1 y NS3. En EO4, la fracción ocupada por el toldo es pequeña, dejando visible la parte de bóveda celeste entre 11° y 22° de elevación. En cambio, en NS1 y NS3, la visión del cielo está enmascarada casi en su totalidad por toldos, cuyas propiedades se resumen en la Tabla 5.2:

	Perforación _M	Obstrucción _R	Reflectividad _M
TOLDO NS1	28 %	53 %	33 %
TOLDO NS3	18 %	69 %	25 %

Tabla 5. 2. Resumen de características de los toldos en NS1 y NS3 extraídas de mediciones sobre muestras (M) o in-situ (R).

[Influencia de la materialidad del tejido sobre las temperaturas del propio toldo]

La característica que gobernará la temperatura aparente del toldo será su reflectancia global, una propiedad dependiente de la combinación entre el porcentaje de perforación y la reflectividad individual de las fibras. Para estudiar su influencia, se ha representado el promedio de temperatura de las regiones de imagen correspondientes a los toldos y al cielo visible de las escenas de estudio (Figura 5. 36). A modo de referencia, en el gráfico se incluye también la temperatura promedio del aire y la del toldo de la escena EO5, con un 89% de obstrucción y la menor reflectividad de los toldos analizados (en apariencia, ya que se disponía de muestra de dicho tejido).

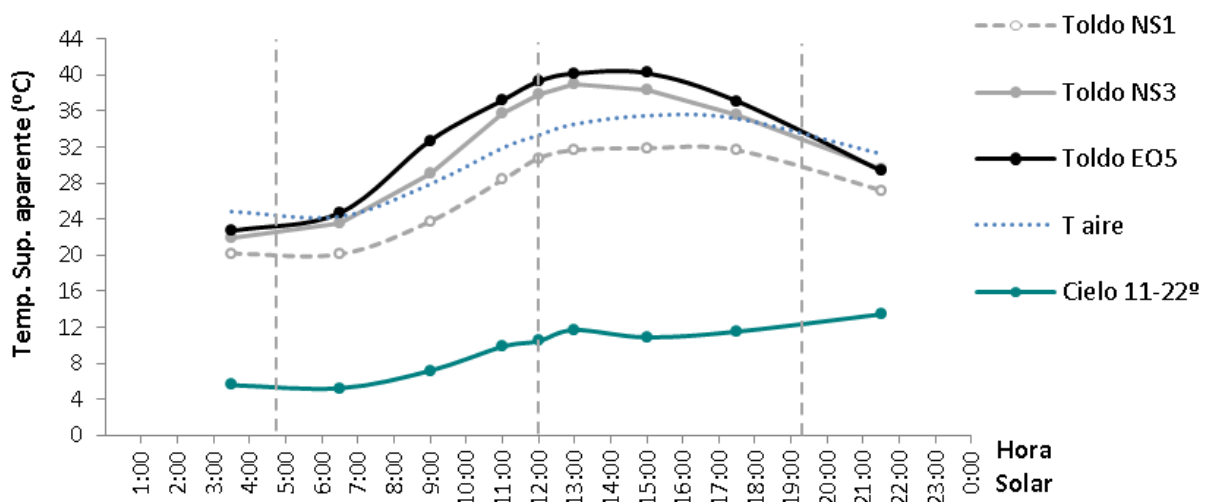


Figura 5. 36. Evolución del promedio de temperaturas superficiales de las áreas de toldo de las escenas EO5, NS1 y NS3 y de la fracción de cielo visible en la escena urbana EO4.

Los resultados muestran que, independientemente de sus características materiales, los toldos se encuentran a temperaturas significativamente más altas que las registradas en el cielo (entre 15°C y 29°C más, dependiendo del toldo y del momento del día). Este diferencial sería mayor si consideráramos el promedio de temperaturas de la bóveda celeste completa, en lugar de la fracción visible en la escena, correspondiente a una elevación baja, donde las temperaturas son notablemente más altas que en el cenit. Esta diferencia de temperatura toldo-cielo se traduce en una diferencia de la radiación de ondas largas, visible en la Figura 5. 37. El día de las mediciones, una jornada despejada, el aumento de flujo en ondas largas proveniente de la zona del cielo por la presencia del toldo fue de entre 40-113 W/m².

En cambio, los toldos presentan unas temperaturas más cercanas a las del aire, con diferencias respecto a éste que oscilaron entre -4°C y +6°C, en función de las características del tejido y el momento del día. Observamos que, cuanto menores son la reflectividad y perforación del toldo, mayor es su obstrucción solar y su temperatura aparente. Así, el toldo de la escena EO5 estuvo, en todo momento, más caliente que el de la NS3, y éste, a su vez, que el de la NS1, cuya temperatura fue inferior a la del aire en todo momento. Observamos que, un aumento de 8 puntos en la reflectividad del toldo (de 25 a 33%), supone una reducción de su máxima de temperatura de 7°C. Dado que los toldos están colocados en una posición cercana a la horizontal, el máximo diferencial entre los toldos se produce en torno a mediodía, momento representado en las termografías y fotografías de la Figura 5. 38. En cambio, durante la noche, las temperaturas de los tejidos tienden a igualarse, quedando a una temperatura inferior a la del aire¹. De estos resultados se deduce que los toldos con una baja reflectividad podrían elevar notablemente su temperatura, algo que perjudicaría a las superficies con mayor visión del toldo, es decir, las situadas bajo él en fachada.

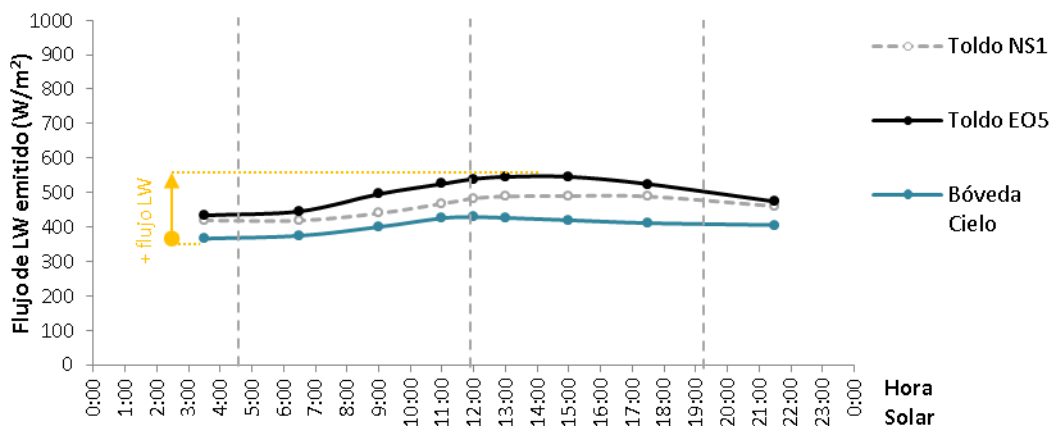


Figura 5. 37. Radiación IR emitida por los toldos de EO5 y NS1 y el cielo sobre plano horizontal².

¹ Es probable que la temperatura nocturna de los toldos se aproxime a la del aire con el que están en contacto, el de la parte alta del cañón, habitualmente más bajo que el de la base, donde se llevaron a cabo las mediciones.

² La radiación emitida por los toldos fue calculada como $L = \sigma \cdot T_{ap}^4$, a partir de las temperaturas de la Figura 5. 36. La emitida por el cielo fue tomada de datos de la estación meteorológica del Aeropuerto Figura 5. 18.

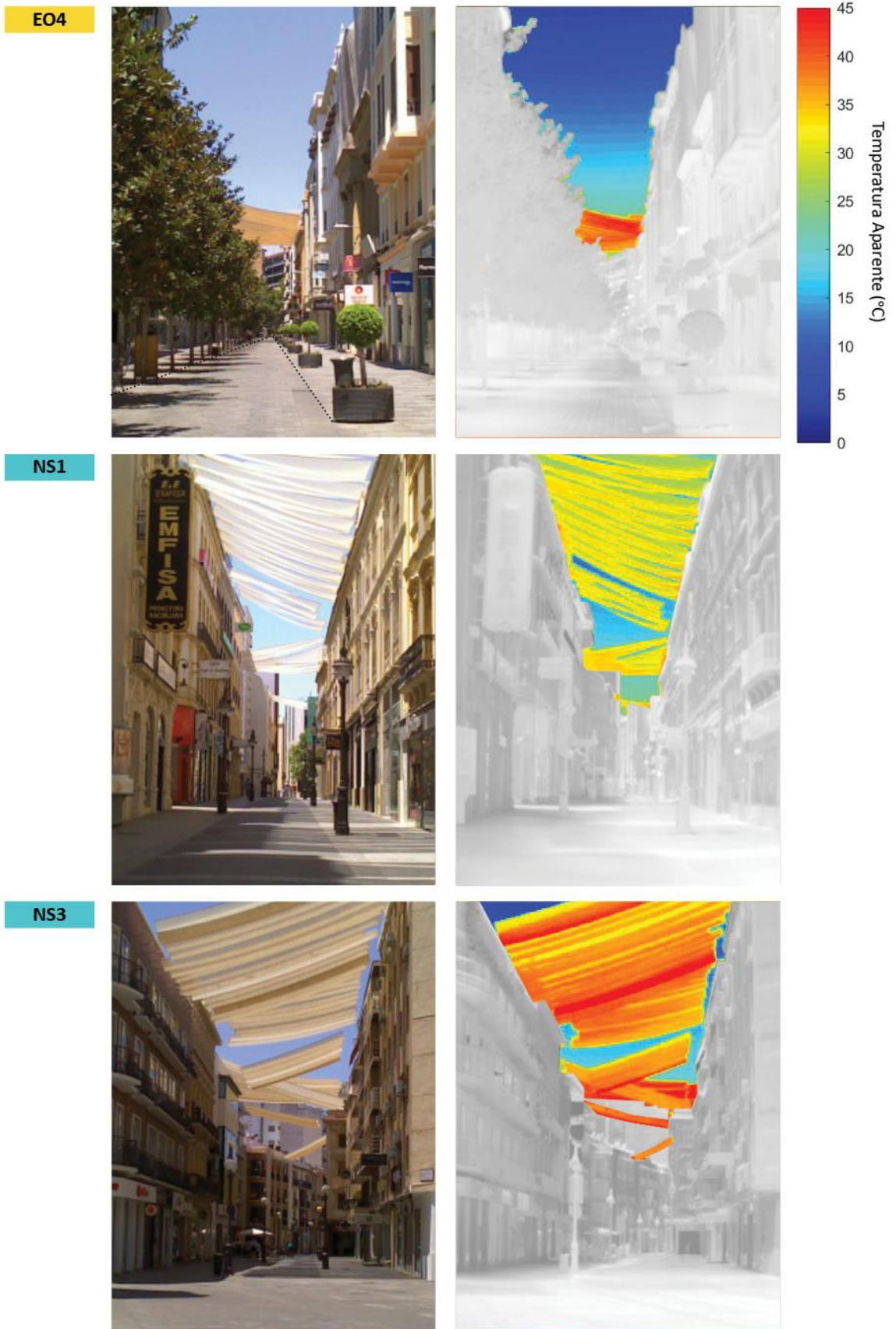


Figura 5. 38. Fotografías y termografías del cielo y del toldo visible en las escenas EO4, NS1 y NS3 a las 12:00.

[Influencia de la materialidad del toldo sobre las Temperaturas de las superficies sombreadas]

Para estudiar esta relación, se analizaron las temperaturas superficiales en dos zonas del suelo de las escenas urbanas NS1 y NS3 (Figura 5.38), con una obstrucción solar similar y el mismo pavimento de granito ($r = 0.1$; $\epsilon = 0.96$). Sin embargo, estas calles están cubiertas por toldos con un nivel de obstrucción solar diferente: de 53%, en el cañón NS1, y de 69%, en NS3. Esta diferencia entre ambos conlleva una variación en la radiación incidente, y posteriormente absorbida por las superficies, que se traducirá en diferencias de temperatura (Figura 5.39). Bajo el toldo del cañón NS3, el pavimento está hasta 18°C más frío que el pavimento al sol de referencia. En el caso de NS1, la diferencia será de 13°C. Las máximas diferencias de temperatura ocurren a las 13:00 ST, una hora más tarde del máximo en la radiación, por efecto de la inercia. La magnitud de las diferencias de temperatura bajo los distintos toldos recalca la importancia del nivel de obstrucción solar del tejido, asociado en las casas comerciales al parámetro “perforación”.

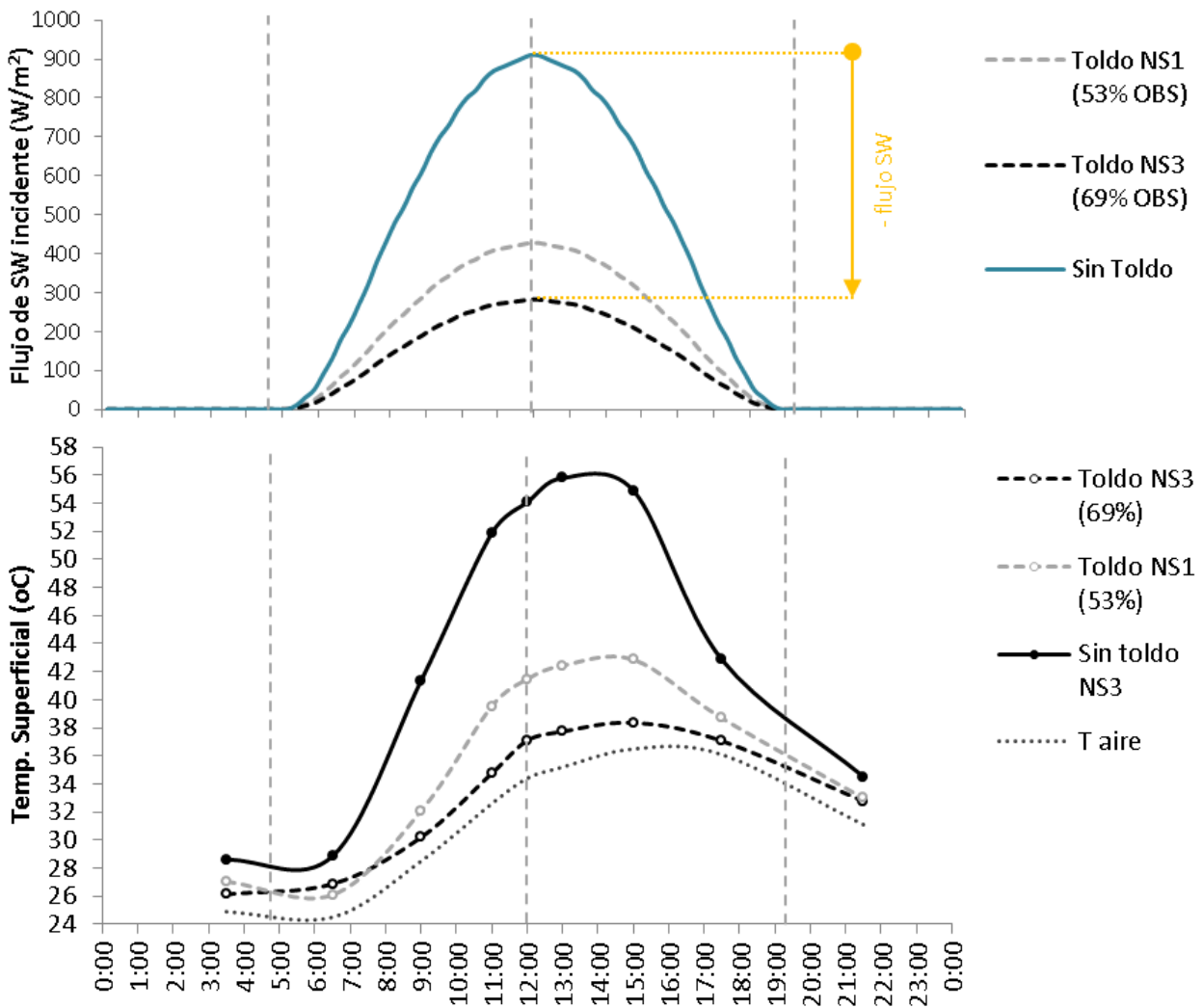


Figura 5. 39. Flujo solar incidente sobre el pavimento (arriba) y de temperaturas superficiales alcanzadas al sol y a la sombra del toldos con distinta obstrucción solar.

5.6.2 Discusión del efecto del toldo sobre el confort del usuario

La presencia del toldo sombrea las superficies, limitando su sobrecalentamiento, lo que modifica el entorno radiativo de la calle tanto en ondas cortas como en ondas largas. Dichas modificaciones tendrán una repercusión sobre el confort del usuario, ya que afectan a la Temperatura Media Radiante (en inglés, *Mean Radiant Temperature* o MRT).

De los parámetros ambientales que intervienen en el confort del usuario³, la MRT es el que entraña una mayor complejidad de determinación (Halawa et al. 2014). La MRT se define como la temperatura uniforme de un recinto imaginario en el que el intercambio de calor por radiación entre el cuerpo humano y dicho recinto es equivalente al intercambio de calor radiante que experimenta con el recinto real. Mientras que la aplicación de esta definición al entorno confinado de una habitación cerrada es bastante evidente, la consideración de este parámetro en espacios exteriores está sujeta a numerosas complejidades e incertidumbres (Erell et al. 2011).

El valor de la MRT puede ser determinado **a través de medición o calculado numéricamente**. Para la medición de la MRT, la ISO Standard 7726 (International Standardization Organization 2002) enumera tres métodos: la medición de la temperatura del globo utilizando un termómetro de globo negro, el uso de dos radiómetros de esfera o el empleo de un sensor de temperatura del aire constante. Nótese que, mediante todos estos métodos, se obtienen valores globales agregados de MRT, eliminando cualquier referencia al reparto espacial de temperaturas que los originaron.

A este respecto, la termografía puede ser más reveladora, ya que proporciona información espacial sobre la distribución de temperaturas. Sin embargo, dicha información no puede ser utilizada, al menos directamente, para obtener la MRT ni para describir los intercambios radiativos en onda larga de la persona con su entorno. La imagen creada en la termografía se obtiene mediante la proyección central de las radiancias infrarrojas del entorno desde el punto en que fue tomada, mientras que, los intercambios radiativos difusos entre superficies están gobernados por la geometría de los factores de vista, obtenidos mediante proyecciones ortogonales del entorno, como se explica en la analogía de Nusselt (Beckers et al. 2009).

En cuanto al **cálculo de la MRT en exteriores**, (Thorsson et al. 2007) señala que se trata de una tarea no inmediata, especialmente en ambientes urbanos complejos. Ello ha motivado el desarrollo de diversos modelos simplificados de cálculo a lo largo del tiempo que han sido integrados en varios software, como *Rayman*, *ENVI-met*, *TownScope*, *SOLWEIG*, etc. Las diferencias entre ellos radican en la forma de aproximar los dos aspectos de los que depende la MRT: los flujos radiantes en las distintas direcciones y los factores de vista, como deduce con la formulación de la MRT incluida en (Lindberg et al. 2008):

³ Además de aspectos psicológicos y perceptuales, el confort térmico depende del efecto combinado de 6 parámetros físicos: temperatura del aire, humedad relativa, temperatura radiante, velocidad del aire, nivel de actividad y nivel de arropamiento (Fanger 1972).

$$T_{mrt} = \sqrt[4]{\frac{1}{\sigma \epsilon_p} \left(\alpha_p \sum_1^6 \phi_{SW_i} F_i + \epsilon_p \sum_1^6 \phi_{LW_i} F_i \right)} \quad (\text{Ec. 5.1})$$

T_{mrt} = Temperatura media radiante

σ = Constante de Stefan-Boltzmann 5.67·10⁻⁸ [W m⁻² K⁴]

ε_p = Emisividad del cuerpo humano (0.97)

α_p = Absortividad del cuerpo humano en SW (0.70)

φ_{SW} = Flujos de radiación en onda corta

φ_{LW} = Flujos de radiación en onda larga

F_i = Factores de vista persona – entorno.

En el cálculo de la MRT, los flujos de radiación se ponderan según los factores de vista entre la fuente y el usuario, indicadores exclusivamente dependientes de la geometría, a diferencia de los flujos de radiación, también afectados por aspectos temporales y materiales. En ambientes urbanos, el cálculo de este parámetro constituye una ardua tarea con resultados poco evidentes, dada la complejidad geométrica del cuerpo humano y del entorno urbano que lo rodea. Para explorar este aspecto en el caso de cañones compactos cubiertos con toldos, se han analizado los factores de vista entre un peatón situado cerca de la fachada Norte en la zona NS1 y su entorno (posición A, en la Figura 5. 40).

Con el objeto de proporcionar una visión global de los intercambios radiativos, se simularon los factores de vista en 6 direcciones. Estas imágenes fueron generadas a partir del modelo 3D de la zona de estudio, empleando el software HELIODON 2, en proyección *orthographic*. En dicho modelo, se diferenciaron 6 tipos de superficies (toldo, pavimento, planta baja de las fachadas Norte y Sur y el resto de plantas de dichas fachadas), por lo que fue posible analizar individualmente su peso dentro de la escena radiativa del peatón. Así, por ejemplo, observamos que al lateral izquierdo del cuerpo, le influirán principalmente las condiciones radiativas de los bajos de la fachada Norte (vista lateral izquierda de la Figura 5. 40). Mientras que el derecho, se verá más afectado por las de los bajos de la fachada Sur y, sobre todo, el pavimento. Estas imágenes evidencian la notable asimetría radiante que puede experimentar el cuerpo humano, un factor que puede influir notablemente sobre el confort del usuario (Halawa et al. 2014), y que sólo es posible analizar si se conoce la distribución espacial de temperaturas sobre las superficies. Con respecto al toldo, observamos que éste afectará en mayor medida a los intercambios radiativos que tienen lugar la cabeza y los hombros del peatón y el entorno, ocupando un 22% del entorno radiativo del usuario en la dirección superior.

A partir de estas imágenes, se pudo estimar el peso relativo de cada superficie dentro del global de la escena radiativa del peatón en este entorno. Para ello, fue necesario ponderar la importancia relativa de cada imagen, ya que la dimensión del cuerpo humano es mucho mayor vista lateralmente, que desde el cenit o el nadir. En este ejemplo, se tomaron los factores de ponderación definidos por Fanger (1972) y adoptados en diversos programas de simulación del microclima como SOLWEIG (Lindberg et al. 2008). Según esto, las áreas de las 4 direcciones laterales se multiplicaron por 0.22 (delante, detrás, derecha e izquierda), y las de las verticales, por 0.06 (superior e inferior).



Figura 5. 40. Diagramas de los factores de vista entre un peatón situado en la posición A y su entorno urbano, en seis direcciones.

Después de aplicar esta ponderación, se obtuvo el factor de vista promedio del usuario hacia cada uno de los tipos de superficies definidos en el modelo (Figura 5. 41). De los resultados se desprende la importancia combinada del pavimento y las plantas bajas de las fachadas, que conjuntamente suponen el 70% de la escena radiativa del peatón. El diseño de estas zonas será por tanto clave para el nivel de confort experimentado por el usuario.

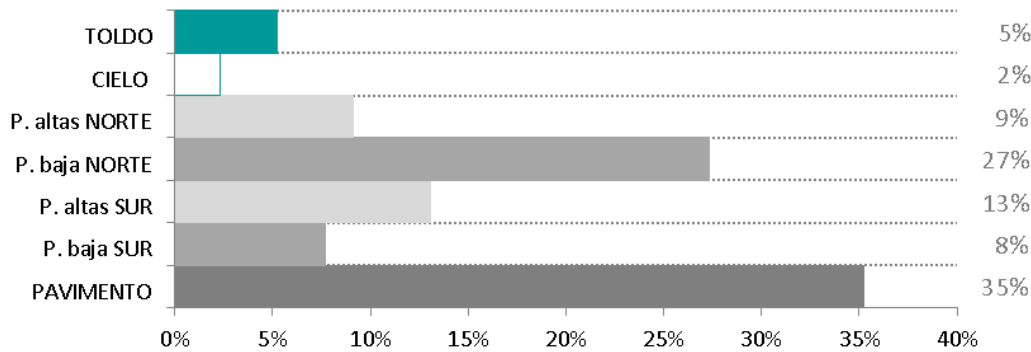


Figura 5. 41. Resultado ponderado de los factores de vista del peatón situado en la posición A y su entorno urbano.

Es importante recalcar que, dado que los factores de forma gobiernan todos los intercambios de radiación difusa independientemente de su longitud de onda, los anteriores gráficos permiten una doble lectura, en ondas cortas y en ondas largas. Así, la proporción ocupada por los diferentes elementos en la imagen nos permite valorar la importancia de cada uno de ellos como fuente de radiación, tanto de radiación solar reflejada del entorno y difusa del cielo, como de radiación infrarroja (ϕ_{SW} y ϕ_{LW} en la ec. 5.1, respectivamente).

En esta línea, resumiremos los efectos del toldo sobre los componentes que afectan a la MRT:

- Proporcionalmente a su nivel de obstrucción solar, el toldo reduce globalmente los flujos de ondas cortas que penetran en el cañón. Esto disminuirá en la misma medida la magnitud por un lado, del flujo solar directo (Φ_{swD}) y, por otro, del flujo solar reflejado enviado por las superficies construidas (ϕ_{SWR}), que además tienen un elevado factor de vista (conjuntamente, suponen el 93% de la escena radiativa).
- Como resultado de lo anterior, las superficies se sobrecalientan menos y disminuye el flujo de radiación en ondas largas que estas envían (ϕ_{LW}). Habitualmente, este efecto será más notable en el caso del pavimento, que ocupa un 35% de la escena y suele absorber gran cantidad de radiación.
- Por otro lado, la presencia del toldo generará un aumento del flujo en ondas largas (ϕ_{LW}) proveniente de la zona del cielo, antes más fría. En relación al peatón, este efecto será poco relevante, ya que el toldo ocupa una porción muy reducida de su entorno radiativo (5%).
- Por tanto, durante el día, dado que la magnitud de la reducción de ϕ_{SW} es muy superior al incremento del ϕ_{LW} en la zona del toldo, el toldo reducirá siempre la MRT.
- Bajo el mismo razonamiento, se recomienda la retirada del toldo cuando sobre él no incida radiación, especialmente durante la noche, buscando un ligero descenso de la MRT.

5.7 CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO

En este capítulo, se ha evaluado el efecto del toldo sobre las temperaturas urbanas, mediante un análisis combinado de secuencias de imágenes termográficas, simulaciones de radiación y de factores de vista. Del trabajo desarrollado, se han podido extraer conclusiones tanto sobre los efectos del dispositivo de sombra, como sobre la validez de la metodología empleada.

[Sobre los efectos del toldo sobre el entorno radiativo de la calle]

La presencia del toldo modifica el ambiente radiativo urbano, tanto en ondas largas como cortas, con efectos que se superponen. Por un lado, la obstrucción solar generada por el toldo disminuye la radiación de ondas cortas incidente sobre las superficies, lo que limita su sobrecalentamiento con respecto al aire (en nuestro caso, hasta en 18°C) y, por consiguiente, el flujo de radiación en ondas largas emitido. Por otro, la parte de la escena antes correspondiente al cielo está ahora ocupada por el toldo, con temperaturas más altas, cercanas a las de aire (en nuestro caso, entre -4°C y +6°C). Este hecho limita las posibilidades de enfriamiento radiativo de las superficies, sobre todo de las situadas inmediatamente bajo él (Figura 5.42), con temperaturas hasta 2°C más altas antes del amanecer.

En función de la orientación del cañón donde se instale, el toldo ha mostrado efectos diferenciados tanto en magnitud como en duración. La sombra generada en el caso de calles compactas con fachadas Este-Oeste se traslada poco, manteniendo una zona concreta del pavimento y de la fachada más fría que el resto durante toda la jornada. En cambio, si el toldo se ubica en calles con fachadas Norte-Sur, su sombra se desplaza mucho a lo largo del día, algo especialmente perceptible en las plantas bajas y en el pavimento. Por tanto, en esta orientación, el toldo afectará a una superficie urbana de mayor extensión, pero este efecto será más breve y de menor magnitud. Basándonos en la evolución de temperaturas en zonas representativas, se ha cuantificado que, gracias a la presencia del toldo, las superficies del pavimento permanecen hasta 16°C más frías en cañones con fachadas Este-Oeste y hasta 12°C en calles con fachadas Norte-Sur. Por su parte, las diferencias de temperatura generadas por el toldo en las fachadas, habitualmente más reflectivas en promedio, serán menos importantes que en el pavimento, aunque significativas, sobre todo en las orientadas a Este y Oeste (en nuestro caso, de hasta 6°C en una pared Oeste con $r=0.5$)

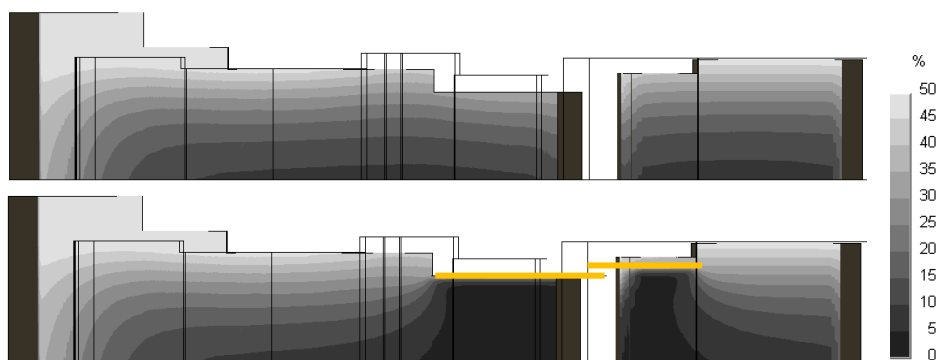


Figura 5. 42. SVF sobre la fachada Oeste de la Calle Cruz Conde, con y sin toldo.

De manera general, el toldo tendrá efectos más notables cuanto mayor sea la radiación incidente sobre la superficie que sombrea. Por ello, en cañones con geometría y latitud similares a las estudiadas, la instalación de un toldo será más positiva a nivel de confort urbano en cañones con fachadas Norte-Sur, ya que éste protegerá de manera prolongada la totalidad de la fachada Sur y el pavimento. Para cañones con fachadas Este-Oeste, el toldo constituirá una eficaz protección solar de las plantas altas de las fachadas durante las primeras y últimas horas del día, lo que reducirá la demanda de refrigeración en el interior de los edificios. En definitiva, podemos concluir que el toldo urbano, siempre que esté situado en la parte superior del cañón, tendrá efectos positivos tanto para el comportamiento energético de los edificios como para el confort exterior del peatón, compensándose dichos efectos en las orientaciones Este-Oeste y Norte-Sur.

El análisis de los resultados ha constatado que las características materiales del tejido tienen una notable influencia sobre su comportamiento ambiental. Por un lado, el nivel de obstrucción solar del toldo condiciona significativamente su capacidad para limitar el sobrecalentamiento de las superficies. En nuestro caso, un aumento de 16 puntos en la obstrucción solar del toldo (de 53 a 69%), disminuyó la máxima temperatura de la zona analizada de pavimento en 5°C (de 37°C a 42°C). Asimismo, los resultados mostraron que los cambios en la reflectividad del tejido se asocian con variaciones significativas en su temperatura, del orden de decenas de grados. De esto se desprende que, la reflectividad y, por tanto, el color, del toldo es un aspecto de diseño a tener en cuenta de cara a maximizar los efectos positivos a nivel microclimático de la instalación de este dispositivo. La temperatura alcanzada por el toldo será un aspecto poco influyente sobre el confort del usuario en este tipo de entornos compactos, donde el cielo y, en consecuencia el toldo, ocupan una porción reducida de la escena térmica global. Sin embargo, su efecto podría afectar negativamente a las superficies que “vean” mucho toldo, es decir, las ubicadas inmediatamente bajo él. En consecuencia, para maximizar los beneficios ambientales del toldo tanto para el peatón como el edificio, deben seleccionarse tejidos con una baja perforación, una alta reflectividad, de fácil limpieza y cuyo color no se deteriore por efecto del sol.

Analizando los resultados en relación al confort del usuario, se confirma el efecto globalmente positivo del toldo, derivado de la reducción de la Temperatura Media Radiante. Esta bajada se debe, en primera instancia, a la reducción del flujo de radiación en ondas cortas que el peatón recibe, proveniente tanto de la componente directa del sol como de la reflejada del entorno, también menos soleado gracias al toldo. En segunda instancia, la bajada de la MRT es resultado de la disminución del flujo emitido en onda larga por las superficies construidas. Dado que éstas ocupan la mayor parte de la escena térmica del peatón (en nuestro ejemplo, el 93%), esta reducción del flujo en ondas largas no será contrarrestada por el aumento del flujo proveniente de la zona del toldo que, en ambientes compactos, ofrece un factor de vista muy bajo hacia el peatón.

[Sobre la metodología empleada]

En este capítulo, la metodología antes testeada en un cañón urbano se aplica a un área más extensa a partir de una toma de datos periódica en varios puntos de medición entre los que se ha trazado un recorrido. Esta característica de la medición genera unas dificultades añadidas que podrían limitar la aplicabilidad de la metodología.

La principal es que, al moverse los equipos de medida entre tomas, pueden producirse cambios en la escena enfocada, que impidan realizar un seguimiento preciso de las temperaturas de las superficies. Los resultados obtenidos en este caso de estudio demuestran que las acciones diseñadas para limitar este desplazamiento son efectivas, ya que más del 92% de los píxeles coinciden en todas las tomas realizadas durante la jornada. De ello, podría deducirse que sería posible repetir la secuencia de imágenes en otras épocas del año utilizando las mismas referencias espaciales.

Los diversos análisis realizados en este caso de estudio han demostrado que, partiendo de un procedimiento común de tratamiento de los datos, es posible llevar a cabo estudios con diferentes finalidades. Este hecho recalca la flexibilidad de la metodología diseñada para ser aplicada en diferentes contextos urbanos y con propósitos de análisis variados.

La valoración ambiental de los entornos urbanos por parte del peatón está condicionada por aspectos visibles y no visibles, como sería el caso de la térmica. La metodología propuesta podría emplearse para obtener información que permita evaluar el confort del usuario en movimiento en relación a las temperaturas de su entorno. De hecho, otra posible lectura de los resultados obtenidos de esta campaña podría ser la interpretación por tomas, como visualización de las condiciones térmicas que experimentaría el peatón en un mismo recorrido según el momento del día. Aunque escasos, existen algunos trabajos en esta línea, como el realizado por Boiné et al. (2018) sobre *Spatio-temporal promenades as representations of urban atmospheres*. La aportación del método propuesto en esta tesis consiste en la sistematización en el tratamiento de la información termográfica que permite una mayor profundidad en análisis de los resultados.

CAPÍTULO 6

CONCLUSIONES

6.1 APORTACIONES DE LA INVESTIGACIÓN

6.2 CONCLUSIONES FINALES

6.3 POSIBLES FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

6.1 APORTACIONES DE LA INVESTIGACIÓN

En esta tesis doctoral se exploraron las posibilidades y limitaciones de la termografía como herramienta de análisis térmico a nivel de calle, disponiendo de unos recursos limitados: una persona, una cámara comercial, un día.

Del análisis de los resultados obtenidos de este trabajo se extrajeron diversas conclusiones:

- A partir de un estado del arte estructurado sobre el uso de la termografía en ambientes contruidos, se detectó que la atención prestada al nivel de calle es limitada, predominando los estudios a escala local y de ciudad (*Epígrafe 2.4*). La escasez de trabajos en la escala intermedia se asoció a la falta de procedimientos de medición y tratamiento de los datos obtenidos, lo que subraya el componente de originalidad del tema central de la investigación y del trabajo metodológico llevado a cabo.
- La temperatura de una superficie es la expresión física última de un complejo balance de flujos de energía por conducción, convección, radiación y evapotranspiración, fuertemente influenciado por las condiciones meteorológicas. Entre los múltiples escenarios posibles, la investigación de tesis se centró en días soleados y sin viento. Esta decisión resultó muy instructiva por dos motivos. En primer lugar, por simplificar la interpretación de los resultados, minimizando el impacto de los flujos por convección y evapotranspiración. En segundo lugar, por proporcionar información sobre el escenario más extremo (útil en cuestiones de diseño), donde se producen las máximas diferencias de temperaturas entre superficies, aire y bóveda celeste.
- Esta tesis se centra en el caso de los cañones urbanos pertenecientes a tramas urbanas compactas. Para responder a la necesidad de visualizar simultáneamente las dos fachadas del cañón, en este tipo de entornos es necesario realizar las termografías en perspectiva. Este enfoque, no habitual dentro de los trabajos termográficos realizados en ambiente urbano, aporta una información adicional útil para comprender los intercambios de energía a nivel de calle. Sin embargo, al alinear la cámara termográfica con el eje de la calle, aumenta la distancia y el ángulo de observación, aspectos que afectan a la interpretación de los resultados (*Epígrafe 2.5*).
- Las dificultades a la hora de interpretar las *perspectivas termográficas* se derivan de los principios de funcionamiento de la tecnología de medición infrarroja. La cámara termográfica no mide directamente temperaturas, sino radiancias que posteriormente convierte en valores de temperatura, en función de ciertos parámetros introducidos por el usuario. Entre ellos se incluyen, precisamente, la distancia de observación y la emisividad, cuyo valor depende del ángulo de observación y resulta crítico en los resultados de temperatura obtenidos tras la calibración. Como consecuencia, las temperaturas obtenidas mediante termografías en perspectiva presentan una cierta desviación con respecto a las registradas desde un enfoque frontal.

- Para **cuantificar la diferencia de temperatura entre los enfoques frontal y rasante** debida a la variación angular de la emisividad, se llevaron a cabo mediciones *in situ* y en laboratorio. Se observó que, en un entorno urbano compacto, las diferencias de temperatura registradas entre ambos enfoques fueron inferiores a 2°C, cifra notablemente más baja que las obtenidas en laboratorio, e igual a la precisión de la cámara. De esto se dedujo que, si bien la desviación de temperatura al usar el enfoque rasante no es tan grave como para imposibilitar el uso de la termografía perspectiva en ambientes urbanos compactos, es un aspecto a tener en cuenta en la interpretación de los resultados (*Epígrafe 2.6*).
- La realización de secuencias termográficas a nivel de calle plantea notables dificultades, tanto de tipo operativo durante la toma de datos, como de procesamiento de los mismos una vez recolectados. Los trabajos realizados en esta tesis han evidenciado que, para poder obtener resultados interpretables, es **imprescindible contar con una metodología específicamente diseñada para el nivel de calle**, que debe ser exhaustivamente descrita y escrupulosamente aplicada durante la campaña de medición. En esta línea, en el *Capítulo 3*, se describe una metodología de adquisición, procesamiento y análisis de datos térmicos, que fue validada en diversos contextos urbanos.
- **En primer lugar, con la cámara en una posición fija**, se evaluaron térmicamente dos cañones urbanos con una relación de aspecto y orientación similares, situados uno en Bayona y otro en Córdoba (*Capítulo 4*). A partir del análisis de las secuencias termográficas y fotográficas obtenidas, se extrajeron diversas conclusiones:
 - **En la Rue des Tonneliers de Bayona**, con una reflectividad media (promedio en fachadas de 0.5), se identificaron los tres fenómenos que gobiernan las temperaturas superficiales en condiciones de cielo despejado: absorción de la radiación solar durante el día, inercia y enfriamiento radiativo nocturno hacia el cielo (correlacionado con el factor de vista del cielo de las superficies). En este cañón, la mancha solar legible en las fotografías se correspondía en la termografía con una zona de temperaturas más altas, en contraste con las zonas en sombra, más cercanas a las del aire. Dentro de la misma fachada, podrá existir una notable heterogeneidad térmica y las fachadas enfrentadas mostrarán comportamientos térmicos anti-simétricos. Por tanto, en este tipo de entornos, la orientación y las obstrucciones solares son elementos clave en relación a las temperaturas de las superficies.
 - **En la Calle de las Rejas de Don Gome de Córdoba**, un entorno altamente reflectivo (promedio en fachadas de 0.73, y de 0.87 en la fachada Sur), las reflexiones jugaban un papel clave a nivel radiativo, homogeneizando tanto la distribución de flujos de radiación en ondas cortas como en largas. En este caso, la mancha de sol directo de las fotografías sólo era reconocible en el pavimento oscuro, mientras que las fachadas enfrentadas presentan una distribución de temperaturas notablemente simétrica.

Por tanto, en entornos altamente reflectivos, la orientación de la trama es un factor poco influyente en relación a la temperatura de las superficies de fachada. Como consecuencia, elementos oscuros en sombra pueden presentar temperaturas más elevadas que otros situados al sol, pero más claros, por efecto de las inter-reflexiones. De hecho, la superficie vertical más caliente del caso de estudio se localizó en el zócalo oscuro de la fachada Norte.

Debido a las diferencias entre ambos casos de estudio, especialmente climáticas, las temperaturas superficiales registradas en cada entorno son muy diferentes en valor absoluto (en Córdoba, las superficies alcanzan 65°C; en Bayona, solamente 36°C). Este hecho, sin embargo, no impide la comparación térmica entre ambas calles, siempre que ésta sea realizada en términos relativos, basándonos en el sobrecalentamiento de las superficies con respecto al aire. Utilizando este enfoque, se produjeron diversas imágenes (ej. *Epígrafe 4.4*). Gracias a ellas se pudo concluir que la simetría en las condiciones térmicas no se debe a la simetría aparente de la calle, sino al valor del coeficiente medio de reflexión, como parámetro que indica la cantidad de reflexiones que se producirán globalmente en el cañón.

- **En segundo lugar, se analizó un área urbana de Córdoba cubierta parcialmente por toldos** fijos de distinto tipo, con el objetivo de evaluar los efectos térmicos de este dispositivo en un entorno real en función de la orientación y de sus propiedades materiales (*Capítulo 5*).

En trabajos previos al doctorado, se había evaluado la repercusión energética del toldo desde un enfoque “tradicional”, basado en simulaciones energéticas de demanda por métodos nodales (*Epígrafe 5.2*). Las limitaciones de este tipo de herramientas al considerar las interacciones con el entorno, sobre todo en ondas largas, plantearon ciertas dudas en relación a los efectos del toldo sobre las temperaturas superficiales. Durante la tesis, se abordó el tema desde la termografía, mediante un trabajo experimental *in situ* que ha aportado nueva información y, también, ha abierto nuevos interrogantes.

Para este estudio, **se realizaron secuencias de imágenes desde 10 puntos representativos** del área de análisis, realizando un mismo recorrido 9 veces en el mismo día. El hecho de mover la cámara entre tomas exigió un mayor rigor al aplicar la metodología, pero permitió la evaluación térmica de un área relativamente extensa dentro de una única campaña de medición.

Dado que la termografía permite un análisis espacializado de temperaturas, fue posible reflexionar paralelamente sobre la repercusión del toldo a nivel de confort del peatón y de demanda energética de los edificios. De este análisis se concluyó que el toldo tendrá efectos térmicos positivos en ambas orientaciones: en la Norte-Sur, especialmente sobre el confort del usuario, gracias a la prolongada disminución de las temperaturas del pavimento; en las Este-Oeste, especialmente sobre la demanda de refrigeración, al limitar el sobrecalentamiento de la fachada.

La evaluación de las termografías evidenció, además, la notable influencia de las propiedades ópticas del tejido sobre la temperatura del toldo y las superficies que sombrea. El porcentaje de obstrucción del toldo será crítico tanto para el confort del peatón como para el comportamiento energético del edificio. En cambio, la reflectividad del tejido, en el caso de los cañones urbanos compactos, afectará principalmente a los intercambios en ondas largas de las superficies de fachada situadas justo por debajo de él, y con ello, a los espacios habitables de plantas superiores.

En definitiva, el toldo modifica el ambiente radiativo urbano, tanto en ondas largas como en ondas cortas, con efectos que se superponen de una forma no evidente. Se pudo constatar que la reducción de temperatura que el toldo genera durante el día (hasta -18°C , al mediodía) sea muy superior al aumento de temperatura durante la noche (hasta $+2^{\circ}\text{C}$, al amanecer). Estos resultados indican, no obstante, que el rendimiento de este dispositivo podría optimizarse retirándolo por la noche. A este respecto, sería interesante una evaluación termográfica más detallada del efecto nocturno del toldo.

- Las campañas de medición no sólo son interesantes por los resultados que muestran, sino por su **capacidad de indicar cómo progresar en la medición** (el paso siguiente y/o los puntos a mejorar), un aspecto de relevancia a nivel de investigación. De hecho, en esta tesis se muestran únicamente los resultados de las mediciones definitivas, pero fue necesaria la realización previa de numerosos tests puntuales y varias campañas de prueba. En este sentido, aunque quedaría fuera del ámbito de la tesis por exigir más recursos materiales y humanos, para próximas campañas se podría: incluir termopares en los puntos de la escena donde se esperen las temperaturas extremas; instalar termómetros en algunos interiores; registrar la temperatura y velocidad del aire a varias alturas del cañón; emplear cámaras térmicas con mayor óptica para reducir la distancia de observación.
- Finalmente, se constató que la información extraída de las secuencias termográficas se puede enriquecer notablemente si se lleva a cabo un **trabajo gráfico adicional** sobre las termografías “en bruto”, con un carácter intencional. Para realizar este tipo de análisis se requieren funcionalidades no disponibles en los programas habituales de las cámaras comerciales, por lo que deberán ser programadas *ad hoc* por el usuario, como ocurrió en esta tesis. Como contribución gráfica original de esta investigación destacaremos el uso de una escala de temperatura relativa a la del aire (en lugar de absoluta, como es habitual) para colorear las termografías. Este enfoque resulta interesante tanto desde el punto de vista físico, al describir el sentido de los intercambios térmicos, como perceptivo, ya que el ser humano evalúa su ambiente de forma relativa.

6.2 CONCLUSIONES FINALES

Desde el punto de vista metodológico

Esta investigación de tesis ha demostrado que **las secuencias de termografías en perspectiva** pueden ser una **herramienta útil** para la evaluación de las temperaturas superficiales a nivel de calle, incluso **contando con unos medios técnicos y humanos reducidos**.

El empleo de la vista en perspectiva ha demostrado ser una estrategia eficaz para maximizar la información que puede obtenerse mediante termografía en el interior de cañones urbanos de tramas compactas. Al alinear la cámara con el eje de la calle se consigue una visión térmica global de la escena urbana analizada, de una manera **mucho más ágil** que mediante la acumulación de mediciones directas de temperatura o termografías frontales. Además, la visualización simultánea de diversas variables, habitualmente estudiadas de forma disgregada, hace más evidentes las interacciones energéticas entre superficies, lo que permite extraer **conclusiones más ricas** que las que pueden obtenerse de la suma de análisis parciales.

El uso de la perspectiva en termografía presenta como desventaja la presencia de **una cierta desviación en las temperaturas** medidas en aquellas superficies de la escena observadas bajo ángulos muy rasantes. Este **inconveniente**, que a nivel teórico podía desaconsejar este enfoque, ha resultado finalmente **poco significativo en la práctica** en el caso de entornos urbanos compactos. Los estudios realizados *in situ* durante la tesis mostraron que en cañones ocluidos este error es reducido (inferior 2°C) y de una magnitud aceptable **para los rangos de precisión necesarios y esperables** en mediciones en ambientes urbanos, notablemente heterogéneos y mutables en el tiempo.

Ante la falta de procedimientos de referencia en la literatura, en esta tesis se desarrolló una **metodología propia para la adquisición y procesamiento de secuencias termográficas a nivel de calle**. Dicho método fue implementado en varios casos de estudio - con diferencias climáticas, geométricas y materiales-, y para diversos fines. De todos ellos se extrajeron conclusiones cualitativas y cuantitativas sobre el comportamiento térmico de las superficies urbanas individuales y de la calle en su conjunto, específicas para cada entorno. Este hecho evidencia tanto la **replicabilidad** de la metodología diseñada, como su **flexibilidad** a la hora de ser exportada a contextos diferenciados. Asimismo, se mostró que, llevando a cabo un **tratamiento gráfico adicional** de las termografías, es posible obtener una información más completa sobre los intercambios de energía dentro del cañón (por radiación y también por convección). En este sentido, la metodología diseñada puede considerarse en sí misma, como una aportación de la investigación doctoral.

Desde el punto de vista arquitectónico

Los estudios termográficos realizados en esta tesis evidenciaron **el potencial de dos tipos de intervención a escala de calle** que, con un impacto constructivo y económico relativamente bajo, poseen una notable capacidad de modificar las condiciones microclimáticas del entorno urbano:

- **Cambios en la reflectividad global de la fachada urbana.**

La comparación entre dos cañones urbanos similares en geometría, pero con diferencias en la reflectividad global de sus fachadas (Córdoba, $r=0.73$; Bayona, $r = 0.50$), evidenció la capacidad de los cambios en el acabado superficial para modificar el comportamiento radiativo de la calle, tanto en ondas cortas como largas.

A este respecto, se subrayó la importancia del **coeficiente de reflectividad**, tanto a nivel local como **global de la fachada urbana**, sobre la temperatura de las superficies del cañón, como parámetro con efectos directos sobre el confort del usuario y el consumo energético para climatización.

Además, se demostró que el empleo de una elevada reflectividad global permite **igualar los comportamientos térmicos en ambas fachadas** en cañones urbanos compactos. Bajo estas circunstancias, las temperaturas de las superficies del cañón urbano son menos dependientes de la orientación del mismo. Esta estrategia puede ayudar a equilibrar las condiciones térmicas (y lumínicas) de las edificaciones a ambos lados del cañón, y con ello, sus demandas energéticas para el acondicionamiento ambiental de los espacios.

A nivel práctico, para poder intervenir sobre la reflectividad global de la calle, es necesario disponer de instrumentos normativos que guíen las actuaciones a dicha escala. Una herramienta útil en este sentido podría ser la carta urbana de colores, de la que ya disponen muchas localidades. Habitualmente los colores seleccionados responden a criterios puramente estéticos, pero sería posible incorporar una revisión de los mismos desde un punto de vista energético.

- **El diseño de la sombra a escala urbana**

Los análisis termográficos realizados en esta tesis han evidenciado el potencial de los elementos generadores de sombra a escala urbana de **modificar el ambiente radiativo global** de la calle, tanto en ondas cortas como en largas.

A partir del estudio de secuencias termográficas de un área entoldada de Córdoba, se corroboró la capacidad del toldo urbano de limitar significativamente el sobrecalentamiento de fachadas y, sobre todo, pavimentos durante el día. Estos dispositivos constituyen **una herramienta de control microclimático doblemente eficaz** desde un punto de vista térmico, independientemente de la orientación de la calle donde se instale, ya que mejoran el confort del peatón en verano a la vez que disminuyen la demanda de refrigeración de los edificios.

Los resultados subrayan la importancia del diseño (geométrico, material y de movimiento) del toldo urbano para maximizar sus efectos térmicos positivos. En este sentido, se recalca la conveniencia de: **i)** ubicar el toldo urbano en la **parte superior** del cañón (o a la mayor altura posible), para evitar el proceso energético “en cadena” que se produce una vez que la radiación solar penetra en el cañón; **ii)** incrementar la **visión del cielo** por parte de las superficies cuando no reciben radiación solar para aumentar su enfriamiento radiativo, bien instalando dispositivos móviles o bien mediante el diseño geométrico; **iii)** usar tejidos con un **alto nivel de reflectividad y obstrucción solar**, con objeto de limitar el sobrecalentamiento tanto de las superficies sombreadas como del propio toldo.

Las dos últimas recomendaciones también son aplicables a otros elementos de sombra presentes en fachada (voladizos, balcones, etc...), cuyo diseño puede ser responsabilidad del arquitecto o estar regulado a nivel normativo.

En definitiva, aplicando el método diseñado en esta tesis es posible obtener **información térmica** de las superficies del cañón **contando con unos recursos limitados**, que puede ser **relevante en diversas aplicaciones**:

- **Para la evaluación del confort del peatón en entornos urbanos reales:**

Los valores de temperatura obtenidos pueden emplearse para un mejor ajuste de la *Temperatura Media Radiante*, variable incluida en el cálculo de diversos índices de confort y con un notable coste computacional. Disponer de información térmica real y espacializada puede ser especialmente importante en entornos urbanos ocluidos, donde los intercambios radiativos en onda larga con el entorno (especialmente en las partes bajas de la fachada y el pavimento) pueden afectar significativamente al confort térmico del usuario.

- **Para la simulación del comportamiento energético de edificios en entornos urbanos:**

Los simuladores energéticos a escala de edificio tienden a considerar de manera muy simplificada los intercambios radiativos con el entorno, especialmente en ondas largas. Incorporando las temperaturas obtenidas en las fachadas por este método podrían obtenerse simulaciones más precisas del comportamiento energético de edificios insertos en tramas urbanas, y con ello, de su demanda energética real, sin necesidad de llevar a cabo un modelo detallado del entorno.

- **Para la toma de decisiones de proyecto a escala urbana:**

Actualmente, resulta complicado obtener información energética real a nivel de calle, escala donde se materializan en realidad los proyectos urbanos. Las observaciones realizadas a partir de las termografías dentro del cañón urbano pueden servir como base para la concepción de proyectos urbanos a esta escala, aportando argumentos de diseño energéticos cuantificables. Esta coherencia entre la escala de análisis y de proyecto constituye un valor adicional del método diseñado.

- **Para la comprensión del funcionamiento energético de entornos urbanos complejos:**

Las temperaturas obtenidas son el resultado físico de los cambios espacio-temporales en el balance global de energía de las superficies urbanas, información de interés desde el **punto de vista de la Física Urbana**. La disponibilidad de datos sobre entornos reales puede contribuir a mejorar nuestro conocimiento sobre la relación entre las propiedades geométricas y materiales de un entorno y su comportamiento térmico, como base necesaria para una planificación a escala urbana que tenga en cuenta aspectos microclimáticos.

6.3 POSIBLES FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

Las campañas de medición realizadas en esta tesis han aportado información sobre el comportamiento térmico de un entorno urbano ya existente, en un día concreto. Sin embargo, sólo a partir de estos datos, resulta complicado deducir el comportamiento de dicho entorno bajo otras condiciones ambientales y, más aún, el de entornos diferentes. En este sentido, se plantean diversas líneas de investigación futuras que pueden complementar los trabajos realizados hasta el momento:

- Realización de campañas de medición adicionales en los mismos escenarios urbanos estudiados en esta tesis, pero bajo **condiciones ambientales diferentes** y/o en otras épocas del año.
- Ampliación del trabajo realizado con otros nuevos casos de estudio, seleccionados por sus **características materiales y geométricas en la parte baja del cañón**, zona que más condiciona el confort del peatón. Por ejemplo, se podría valorar la influencia sobre el confort del diseño de planta baja de los edificios, en relación a su transparencia, especularidad o la presencia de vegetación.
- Ante las dificultades para conocer la “temperatura real” de las superficies, un enfoque interesante sería trabajar directamente en **términos de flujos de radiación en onda larga**, uno de los términos presentes la ecuación de balance de energía que se usa en algunos índices de confort térmico. Podría trabajarse, por ejemplo, sobre termografías en 3D que describan los flujos radiativos que el entorno envía al peatón.

Para una verdadera incorporación de la térmica al planeamiento urbano, es necesario poder analizar escenarios aún no construidos o modificaciones de los existentes. Además, sería interesante poder calcular balances energéticos anuales. Para conseguir de ambos objetivos, es necesario avanzar en la **simulación térmica a escala urbana**. Las herramientas actuales de simulación térmica dinámica de edificios o distritos, basadas en métodos nodales, son incompatibles con la obtención de termografías simuladas, por la drástica simplificación que llevan a cabo. Una posible solución sería el paso a métodos de elementos finitos (FEM). Pero aun así, seguirían existiendo notables desafíos en relación a la construcción del modelo urbano (falta de información geométrica y semántica, equilibrio en el nivel de detalle, manejabilidad de los modelos, etc) y a la introducción de las condiciones de contorno para la simulación (disponibilidad de archivos climáticos, falta de información sobre el cielo en ondas largas, aspecto que puede ser de importancia, ver *Capítulo 4*). Además, para la validación de los futuros simuladores térmicos a escala urbana, será necesario disponer de **casos de test**, actualmente escasos y pobremente documentados. En este sentido, los casos de estudio seleccionados para esta tesis, así como la metodología desarrollada, podrían constituir un punto de partida.

CHAPTER 6

CONCLUSIONS

6.1 FINDINGS COMPILATION

6.2 FINAL CONCLUSIONS

6.3 POSSIBLE FUTURE RESEARCH LINES

6.1 FINDINGS COMPILATION

In this thesis, potentials and limitations of thermography have been explored as a tool for thermal analysis at a street level with limited resources. The question posed was: what can we learn from the thermal environment of a certain street with a commercial thermal camera operated by one person for a day?

From the analysis of results obtained from this work, several conclusions have been drawn:

- Based on a structured state of the art about the use of thermography in the built environment, it has been highlighted the little attention paid to the street scale compared to local element or city studies (*Subsection 2.4*). In this regard, the scarcity of studies focused on the intermediate scale has been associated to the lack of well-established IR measurement and post-processing data procedures. This fact emphasizes the originality of the main research topic of the present thesis and the methodological work carried out.
- The temperature of a surface reflects the physical result of a complex energy balance of convection, conduction, radiation and evapotranspiration fluxes taking place on it, strongly affected by meteorological conditions. Among the multiple climatic scenarios, this research has focused on sunny days with virtually no wind. This decision has resulted to be an instructive approach for two reasons. Firstly, it allows simplifying the results interpretation, minimizing the impact of convection and evapotranspiration fluxes. Second, it provides information about the most extreme case, when maximum differences between air, surfaces and sky vault take place, which can be helpful for design purposes.
- This thesis focuses on urban canyons characterized by a compact geometry. Within this kind of high-occluded built environments, thermographies require to be shot from a perspective view to allow a simultaneous view of both facades. This approach, unusual in thermographic studies in the urban context, provides additional information, useful for a better understanding of the energy exchanges at a street level. Nevertheless, by aligning the camera view to the street axis, the observation angle and the distance to the target grow, two aspects that may hinder the interpretation of thermography results (*Subsection 2.5*).
- Challenges in the interpretation of *thermographic perspectives* are a result of the operating principles of infrared measure technologies. Infrared cameras provide indirect temperature measurement obtained by converting the radiances values measured by the device to temperature values, depending on several settings defined by the user. Two of them change when a perspective view is used, affecting the thermal data obtained after the calibration: the camera-target distance and the emissivity (which depends on the observation angle). As a result, temperatures values obtained from thermographies in perspective may exhibit some deviation compared to the ones obtained from a frontal view.

- Several measurements were carried out both in situ and laboratory, in order to **quantify the temperature deviation** between the frontal and perspective views due to the angular variation of emissivity. It was observed that, within a compact urban environment, the temperature deviation between the two views was lower than 2°C, a remarkably lower value than the ones found in laboratory measurements and similar to the camera accuracy. Based on these findings, it was concluded that the deviation in temperature when using perspective view in thermography is not important enough to discard the use of this approach, though it should be taken into account when interpreting the obtained results (*Subsection 2.6*).
- Carrying out thermographic sequences at a street level poses significant challenges, both during the data acquisition and for the post-processing of the collected data. Works in this thesis demonstrated that, in order to obtain experimental results suitable for further interpretations, a **method specifically designed for the street scale is needed**, and that it should be exhaustively described and carefully followed. In this vein, a workflow for the acquisition, post-processing and analysis of thermographic data was developed (*Chapter 3*), and validated in several urban contexts (*Chapter 4 and 5*).
- **First, with the camera placed in a static position**, two urban canyons with similar orientation and cross-section, one located in Cordoba and the other in Bayonne, were evaluated from a thermal point of view (*Chapter 4*). Based on the sequences of photographs and thermographies obtained, the following conclusions were drawn:
 - **In Tonneliers street (Bayonne)**, with an intermediate reflectivity (an average of 0.5 over façades), the three phenomena driving changes in surface temperatures under clear-sky conditions were identified: absorption of solar radiation during daytime, inertia effects and radiative cooling towards the sky during nighttime (correlated to the sky view factor pattern over surfaces). In this urban canyon, the solar patch visible on photographs corresponded to an area of high surface temperatures, contrasting with the shaded zones at temperatures closer to that of the air. Under sunny conditions, a remarkable thermal heterogeneity exists over a single façade and opposing façades may exhibit anti-symmetrical thermal behaviors. Consequently, it can be stated that the orientation and solar obstructions are key factors with regard to the surface temperatures of environments with a medium or low reflectivity.
 - **Rejas de Don Gome street (Cordoba)** represents a highly reflective urban environment (average of 0.73 over façades and 0.87 over the south façades). In this case, the reflected energy turned out to be a key factor regarding the radiative budget of surfaces, homogenizing the distribution of shortwave and longwave fluxes. In this case, the solar patch is only visible on thermographies over the dark pavement, while opposing façades show a quite symmetrical temperature pattern.

Consequently, it can be stated that, in highly reflective urban canyons, the tissue orientation does not affect significantly surface temperature. As a result, dark shaded elements may be warmer than sunlit but light ones due to the inter-reflections. In fact, the warmest vertical surface of this study case was located on the dark-brown bottom part of the North façade.

As a result of the differences between both case studies, especially climatic conditions, the surface temperatures registered in each environment are very different in absolute value (surfaces reach 65°C in Córdoba, 36°C in Bayonne,). This aspect, though, does not prevent the thermal comparison between both streets, as long as it is carried out in relative terms, based on the surface over-heating with respect to the air. Using this approach, several images were produced (e.g. in *Subsection 4.4*). From its analysis it was concluded that the symmetry in thermal conditions is not due to the apparent symmetry of the street, but to the value of the average reflection coefficient, as an indicator of the amount of reflections occurring within the canyon.

- **Second, an urban area of Córdoba partially covered by different urban sunshades was analyzed.** The aim of this case study was to evaluate the thermal effects of this kind of devices in a real environment, depending on the orientation and its material properties (*Chapter 5*).

Prior to the PhD research, the energetic repercussion of urban sunshades had been evaluated, from a more traditional approach, by simulating energy demand using simulation tools based on nodal methods (*Subsection 5.2*). This kind of tools usually takes into account interactions with the urban environment in a limited way, especially regarding longwave exchanges. In this regard, some doubts rose from the assessment of the sunshade effects on the surface temperatures obtained from former studies. During the thesis, this subject was addressed through experimental work by means of thermography. This approach has provided new information but, also, has posed new questions.

In this study, **ten image time-lapses were created** by shooting visible and thermal pictures from ten representative locations, following the same path nine times in a day. Moving the camera between consecutive shots required an even more rigorous application of the method. However, thanks to this approach, it was possible to perform the thermal evaluation of a quite larger area with a single measurement campaign.

Thermography shows spatialized information about surface temperature, allowing to analyses simultaneously the impact of sunshades on pedestrian's comfort and on the energy demand of buildings. From this analysis, it was concluded that this kind of shading devices has positive thermal effects in both street orientations: in the North-South, especially on user's comfort, thanks to a sustained decrease in pavement temperatures; in the East-West, especially on the cooling demand, by limiting the façade overheating.

Additionally, this thermographic analysis highlighted the remarkable influence of the optical properties of the fabric on the temperature of the shaded surfaces and the sunshade itself. The percentage of obstruction is critical for both pedestrian's comfort and building thermal behavior. The reflectivity of the fabric, in the case of compact urban canyons, mainly affect the longwave exchanges of the façade surfaces located just below it, and thus, the living spaces of higher floors.

Urban sunshades modify the street radiative environment, both in longwave and shortwave radiative terms, with effects overlapping in a non-obvious way. It was found that the reduction in temperature generated by the sunshade during the daytime (up to -18°C , at noon) is much higher than the increase in temperature during the nighttime (up to $+2^{\circ}\text{C}$, at dawn). This results indicate, though, that the performance of this device could be optimized by retiring the device at night. In this regard, a more detailed thermographic evaluation of the night effect of urban sunshades would be interesting.

- Measurement campaigns are interesting not only for their findings but also for their ability to **guide future measurements** (the next step and/or the points to improve). This aspect is undoubtedly relevant from the research point of view. In fact, this thesis document only presents the results of the final measurement campaigns, but it was necessary to carry out a significant number of tests beforehand. Although it is out of the scope of the present thesis, because of the need for more material and human resources, next campaigns could include: thermocouples where the extreme temperatures are expected; air thermometers in some interiors; air temperature and wind velocity recordings at various street heights; IR cameras with a wide-angle lens to reduce the observation distance.
- Finally, this thesis showed that the information obtained from the infrared sequences can be significantly enriched by carrying out **an intentional graphical work** over the "raw" thermographies. The functions required to perform this type of analysis, though, are not available in the commercial software of regular IR cameras. Therefore, the user should program them *ad hoc* by, as it was done in this thesis. An original graphic contribution of this doctoral research in this sense was the colorization of thermographies using a temperature scale relative to the air temperature, instead of absolute, as usual. This approach is doubly interesting: from the physical point of view since it describes the sense of the thermal exchanges, and from the point of view of human perception since the human being evaluates his environment in a relative way.

6.2 FINAL CONCLUSIONS

From the methodological point of view

This thesis research has shown that **perspective thermography sequences** can be a **useful tool** for the evaluation of surface temperatures at street level, even when **limited technical and human resources are available**.

The use of perspective view has proven to be an effective strategy to maximize the information obtained by means of thermography inside compact urban canyons. Aligning the camera with the street axis provides a global thermal vision of the urban scene in a much **more agile way** than by the accumulation of direct measurements of temperature or frontal thermographies. Besides, variables usually studied in a disaggregated way, are now simultaneously visualized. Energy interactions between surfaces are more evident in this way, what allows drawing more valuable conclusions than the ones obtained from partial analyses.

The main disadvantage of the use of the perspective in thermography is the presence **of a certain deviation in the temperatures measured** in the scene surfaces observed under very low angles. This **drawback**, which could theoretically discourage the use of perspective in thermography, has finally turned out to be **not relevant in practice in the case of compact urban environments**. The studies carried out *in situ* during the thesis showed that this error is small in occluded urban tissues (lower 2oC) and its magnitude may be acceptable for the **accuracy ranges required and expectable** for measurements performed in urban settlements, highly heterogeneous and mutable environments over time.

In response to the lack of reference procedures in the literature, in this thesis, it was necessary to develop a **method for the acquisition and processing of thermographic data at the street level**. This method was applied in several case studies with climatic, geometrical and material differences, for varied purposes. In all cases, qualitative and quantitative conclusions were drawn about the thermal behavior of the individual urban surfaces and of the street as a whole, specific for each environment. This fact shows both the **repeatability** of the designed methodology and its **flexibility** to be applied to differentiated contexts. It was also shown that an **additional graphical post-processing** of the thermographies allow obtaining a more comprehensive information about the energy exchanges within the canyon (by radiation and also by convection). In this sense, the designed methodology itself may be considered as contribution of doctoral research.

From the architectural point of view

Thermographic studies in this thesis underlined **the potential of two types of interventions at street level** that, with a relatively low constructive and economic impact, have a remarkable ability to modify the microclimatic conditions of the urban environment:

- **Changes in the global reflectivity of the urban façade.**

Two urban canyons with similar geometry but differences in the global reflectivity of their façades were compared (Córdoba, $r = 0.73$; Bayonne, $r = 0.50$). Results showed that changes in surface coatings are able to modify the radiative behavior of the street, both in short and longwaves.

In this regard, the key role of the **reflection coefficient** - in both **local and global terms for the street façade** - on the final surface temperature was highlighted, as a parameter with direct effects on user's comfort and the building energy consumption.

Additionally, results demonstrated that, in streets with an occluded geometry, **thermal behaviors on both facades may be balanced** by using a high global reflectivity. Under these conditions, temperatures exhibit by street surfaces would be less dependent on their orientation. This strategy could also contribute to balance thermal – and lightning – conditions of the living spaces behind the street façade, and consequently, their energy demands.

In order to be able to modify the global street reflectivity **in practice**, adequate normative instruments should be available for this scale. A useful tool in this regard would be the urban color catalogues, already mandatory in lots of historical cities. The color selection criteria are usually based just on aesthetics aspects; however, additional considerations from an energy point of view could be easily incorporated.

- **Urban shading design**

Thermographic analysis in this thesis have underlined the potential of urban-scale shading devices to modify the **global radiative environment** of the street, both in short and longwaves.

Based on the thermographies time-lapses shot in Córdoba, it was possible to corroborate the effectiveness of urban sunshades to significantly reduce the daytime overheating of facades and street pavement. Regardless the street orientation where they are installed, these devices constitute doubly effective microclimatic-control tools from a thermal point of view with a positive impact on the pedestrian summer comfort and on the reduction of the cooling demand.

Results highlighted the key role of sunshades design - from a material, geometrical and operation point of view – on the thermal effectiveness of the device. In this regard, it would be advisable to: **i)** place sunshades **on the top of the urban canyon** (or at highest point possible), to avoid the “knock-on radiative effect” taking place once the solar radiation enters into the street canyon; **ii)** increase the **amount of visible sky** from non-sunlit surfaces to enhance their radiative cooling towards the sky vault, by installing movable devices or changing its geometrical layout; **iii)** select tissues with a **high reflectivity and solar obstruction** to reduce the overheating of both the shaded surfaces and the device itself.

The last two remarks also apply to other shading elements on the façade (overhangs, balconies, etc ...), whose design may be the responsibility of the architect or be regulated at the regulatory level.

Finally, thanks to the designed method, it was possible to obtain, **even with limited resources, relevant thermal information** about street surfaces, which may be **for various uses**:

- **For the assessment of pedestrian's comfort within the urban environment**
Temperature values obtained by means of perspective thermography may be used for a better adjustment of the *Mean Radiant Temperature* (MRT), a variable included in the calculation of various comfort indexes with a remarkable computational cost. The availability of actual and spatialized thermal information about street surfaces may be especially important in occluded urban geometries, where longwave exchanges with the environment (especially surfaces on the bottom of the canyon) may significantly affect the thermal user's comfort.
- **For the simulation of the energy behavior of buildings located in urban environments**
Energy simulation tools at building scale tend to consider in a very simplified way the radiative exchanges with the environment, especially longwave fluxes. By including the facade temperatures obtained through this method, more accurate predictions of the energy behavior - and consequently, of the energy demand - of buildings comprised in urban plots could be made, without the need of more detailed urban models.
- **For the decision-making in urban projects**
At the street scale, where real urban projects materialize, getting actual thermal information may be a challenging task. Observations from thermographic studies inside the urban canyon may be a useful contribution to the conception of urban projects on this scale, providing design arguments on a quantifiable energy basis. The coherence between the analysis and project scales constitutes an additional value of the designed method.
- **For enhancing the comprehension of energy behavior of complex urban environments**
Temperature values obtained by this method reflect spatiotemporal changes in the global energy balance of urban surfaces. This information may be relevant from the point of view of the **Urban Physics** research field. The availability of actual data about urban environments may contribute to improving the scientific knowledge about the relationship between the geometric and material properties of an environment and its thermal behavior. This aspect constitutes the necessary starting point for the implementation of an urban planning taking into account microclimatic aspects.

6.3 POSSIBLE FUTURE RESEARCH LINES

Thermographic measurements carried out in this thesis provided information about the thermal behavior of an existing urban canyon during a specific day. However, based just on these data, it is difficult to deduce the behavior of these very surfaces under different environmental conditions and, even more, that of the ones comprised within other urban environments with different features. In this sense, several research lines are proposed to complement the work carried out so far:

- Perform additional measurement campaigns in the same urban scenarios studied for this thesis but under **different environmental conditions** and/or at other times of the year.
- Assessment of additional case studies selected on the basis of the material and geometric **characteristics of the bottom part of the canyon**, a key aspect for the pedestrian's comfort. In this vein, it could be assessed the influence of the façade design on pedestrian comfort depending on their transparency, specularity or the presence of vegetation of the ground floor.
- Given the difficulties in knowing the "actual temperature" of the surfaces, an interesting approach would be to directly analyze **longwave radiation fluxes**, which constitute one of the terms included in the energy balance used in thermal comfort indexes. For example, it could be instructive to work on *3D radiograms* describing radiative fluxes received by a pedestrian from its surroundings.

In order to take into consideration thermal aspect in the urban planning process, it is necessary to be able to analyze not-yet-built scenarios or the effects of modifying the existing ones. Besides, it would be interesting to calculate annual energy balances. To achieve both objectives, our current capacity to perform **thermal simulation at an urban scale** needs to be improved. The existing tools of dynamic thermal simulation for buildings or districts, mostly based on nodal methods, do not allow obtaining simulated thermographies, due to the drastic geometrical simplification they carry out. A possible improvement in this sense would be the use of finite element methods (FEM). Even so, significant challenges would remain regarding the construction of the urban model (lack of geometric and semantic information, choice of the suitable level of detail, interactivity of the model, etc.) and the introduction of the boundary conditions to run simulations (availability of climate files, lack of longwave sky models, which may be important in some cases, see *Chapter 4*). Additionally, some appropriate **test cases** will be required to validate the urban thermal simulation tools to come. Since the case studies currently available are still scarce and poorly documented, the ones selected for this thesis and the methodology developed may constitute a starting point.

BIBLIOGRAFÍA

BIBLIOGRAFÍA

A

- Acién Almansa, M., 2001. La formación del tejido urbano en al-Andalus. In J. Passini, ed. *La ciudad medieval: de la casa al tejido urbano*. Universidad de Castilla-LaMancha, pp. 11–32.
- Alexander, E.R., 1993. Density measures: a review and analysis. *Journal of Architectural and Planning Research*, 10(3).
- Ali-Toudert, F. & Mayer, H., 2006. Numerical study on the effects of aspect ratio and orientation of an urban street canyon on outdoor thermal comfort in hot and dry climate. *Building and Environment*, 41(2), pp.94–108.
- Artis, D.A. & Carnahan, W.H., 1982. Survey of emissivity variability in thermography of urban areas. *Remote Sensing of Environment*, 12(4), pp.313–329.
- Asano, K. & Hoyano, A., 1996. Development of an urban thermal environment measurement system using a new spherical thermography technique. In *Proceedings of SPIE Conference on Thermosense*.
- Asdrubali, F., Baldinelli, G. & Bianchi, F., 2012. A quantitative methodology to evaluate thermal bridges in buildings. In *3rd International Conference on Applied Energy*. Perugia (Italy), pp. 365–373.
- ASTM International, 1998. *ASTM E1862-97: Standard Test Methods for Measuring and Compensating for Reflected Temperature Using Infrared Imaging Radiometers*,
- ASTM International, 2006. *ASTM E1933-97: Standard test methods for measuring and compensating for emissivity using infrared imaging radiometers*, West Conshohocken, PA.
- Avdelidis, N.P. & Moropoulou, A., 2003. Emissivity considerations in building thermography. *Energy and Buildings*, 35, pp.663–667.

B

- Balaras, C.A. & Argiriou, A.A., 2002. Infrared thermography for building diagnostics. *Energy and Buildings*, 34, pp.171–183.
- Barr, E.S., 1963. The infrared pioneers III: Samuel Pierpont Langley. *Infrared physics*, 3, pp.195–206.
- Barr, E.S., 1962. The infrared pioneers II. Macedonio Melloni. *Infrared physics*, 2(1842), pp.67–73.
- Barreira, E. & de Freitas, V.P., 2007. Evaluation of building materials using infrared thermography. *Construction and Building Materials*, 21(1), pp.218–224.
- Batty, M., 2009. Defining density. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 36(4), pp.571–572.
- Beatley, T., 2000. *Green Urbanism: Learning from European Cities*, Washington, D. C.: Island Press.
- Beckers, B., 2016. Multiscale Analysis as a Central Component of Urban Physics Modeling. In A.

- Ibrahimbegovic, ed. *Computational Methods for Solids and Fluids: Multiscale Analysis, Probability Aspects and Model Reduction*. Springer International Publishing, pp. 1–28.
- Beckers, B., 2013. *Solar energy at urban scale*, John Wiley & Sons.
- Beckers, B., 2009. Las escalas de la luz. In *International Conference Virtual City and Territory*. Barcelona, pp. 417–426.
- Beckers, B. & Rodriguez, D., 2009. Helping architects to design their personal daylight. *WSEAS Transactions on Environment and Development*, 5(7), pp.467–477.
- Beckers, B., Masset, L. & Beckers, P., 2009. Commentaires sur l’analogie de Nusselt. Available at: www.heliodon.net.
- Beckers, B. & Masset, L., 2006. *Heliodon 2. Software and User Guide*, Available at: www.heliodon.net.
- Berger, X., Buriot, D. & Garnier, F., 1984. About the equivalent radiative temperature for clear skies. *Solar Energy*, 32(6), pp.725–733.
- Berke, P.R., 2002. Offer a New Direction for Planning? Challenges for the Twenty-First Century. *Journal of Planning Literature*, 17(1), pp.21–36.
- Biljecki, F., Ledoux, H. & Stoter, J., 2016. An improved LOD specification for 3D building models. *Computers, Environment and Urban Systems*, 59, pp.25–37.
- Blanco, R., 2012. Video: Desvelando la Córdoba arqueológica: Qurtuba: La vivienda en la Córdoba islámica. Available at: <https://www.youtube.com/watch?v=RzMVsZxiL-U>.
- Blanco-Guzmán, R., 2014. Una ciudad en transición: el inicio de la Córdoba islámica. *Monografías de arqueología cordobesa. Ciudad y territorio: transformaciones materiales e ideológicas entre la época clásica y el Alto medioevo*, 20, pp.185–199.
- Bliss, R.W., 1961. Atmospheric radiation near the surface of the ground: A summary for engineers. *Solar Energy*, 5(3), pp.103–120.
- Boada i Xairó, S., 2013. *Los Límites del vidrio: aproximación analítica a los límites de las prestaciones energético-lumínicas del vidrio*. Tesis de Master, Universitat Politècnica de Catalunya.
- Bochaca, M. & Bolumburu, B.A., 2016. *Bayonne au Moyen Âge. Topographie et paysages urbains*. B.A.B., Santander.
- Boiné, K., Demers, C.M.H. & Potvin, A., 2018. Spatio-temporal promenades as representations of urban atmospheres. *Sustainable Cities and Society*.
- Bourgeois, D., Reinhart, C. & Ward, G., 2008. A Standard Daylight Coefficient Model for Dynamic Daylighting Simulations. *Building Research & Information*, 36(1), pp.68 – 82.
- Bouyer, J., Inard, C. & Musy, M., 2011. Microclimatic coupling as a solution to improve building energy simulation in an urban context. *Energy and Buildings*, 43(7), pp.1549–1559.
- Boyko, C.T. & Cooper, R., 2011. Clarifying and re-conceptualising density. *Progress in Planning*, 76(1), pp.1–61.
- Breheny, M., 1996. Centrists, decentrists and compromisers: Views of the future of urban form. In and K. M. J. Elizabeth Burton, ed. *The compact city: A sustainable urban form?*. London: Taylor &

- Francis Group, pp. 10–27.
- British Standards, 2008. *BS-ISO-18434-1: Condition monitoring and diagnostics of machines. Thermography. General procedures*,
- Burchell, R.W. et al., 1998. *The costs of sprawl-revisited*, National Academy Press, ed., Washington, DC.
- Burdett, R. & Sudjic, D. eds., 2011. *Living in the endless city*, London: Phaidon Press Ltd.
- Burton, E., 2002. Measuring urban compactness in UK towns and cities. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 29(2), pp.219–250.

C

- Carlomagno, G.M. & Cardone, G., 2010. *Infrared thermography for convective heat transfer measurements*,
- Castro del Río, M., 2018. *Memoria de Licitación de Proyecto de entoldado de calles del centro de Córdoba 2018*, Córdoba: Ayuntamiento de Córdoba - Delegación de Medio Ambiente e Infraestructuras.
- Cheng, V., Steemers, K., Montavon, M., et al., 2006. Compact cities in a sustainable manner. In *International Solar Cities Congress*. pp. 1–11.
- Cheng, V., Steemers, K., Montavon, M., et al., 2006. Urban Form , Density and Solar Potential. In *PLEA 2006 - 23rd Conference on Passive and Low Energy Architecture*. Geneva, Switzerland.
- Cheung, H.D. & Chung, T.M., 2005. Calculation of the Vertical Daylight Factor on Window Façades in a Dense Urban Environment. *Architectural Science Review*, 48(1), pp.81–91.
- Churchman, A., 1999. Disentangling the concept of density. *Journal of Planning Literature*, 13(4), pp.389–411.
- Clausing, T., 2007. *Emissivity : Understanding the difference between apparent and actual infrared temperatures*,
- Coch, H., 1998. Bioclimatism in vernacular architecture. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2(1-2), pp.67–87.
- Compagnon, R., 2004. Solar and daylight availability in the urban fabric. *Energy and Buildings*, 36(4), pp.321–328.
- Costanzo, A. et al., 2014. Combined use of terrestrial laser scanning and IR Thermography applied to a historical building. *Sensors (Switzerland)*, 15(1), pp.194–213.
- Crawley, D.B., Hand, J.W. & Griffith, B.T., 2008. Contrasting the capabilities of building energy performance simulation programs. , 43, pp.661–673.
- Curreli, A., 2016. *El acceso solar a la escala del tejido urbano. El enfoque morfológico y el método de análisis comparativo aplicados al caso de Barcelona*. Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Cataluña.

Curreli, A. & Coch, H., 2013. 3D geometrical modelling and solar radiation at urban scale - morphological or typological digital mock-ups? *CISBAT International Conference*, pp.1029–1034.

D

DesignBuilder, 2009. DesignBuilder: User's Manual. , pp.1–642. Available at: <http://www.designbuildersoftware.com>.

Ditchburn, R.W., 1961. *Light*, New York: Interscience Publisher.

Doulos, L., Santamouris, M. & Livada, I., 2004. Passive cooling of outdoor urban spaces. The role of materials. *Solar Energy*, 77(2), pp.231–249.

Duplantier, D. & Contamin, O., 2012. *Bayonne, ville d'art et d'histoire* Koegu., Bayonne.

E

Erell, E., 2008. The Application of Urban Climate Research in the Design of Cities. *Advances in Building Energy Research*, 2(1), pp.95–121.

Erell, E., Pearlmutter, D. & Williamson, T., 2011. *Urban microclimate : designing the spaces between buildings*, Washington, D. C. : Earthscan.

Escobar Camacho, J.M., 1987. El recinto amurallado de la Córdoba bajomedieval. *En la España medieval*, 10(La ciudad hispánica durante los siglos XIII al XVI (III)), pp.125–152.

European Environmental Agency, 2016. Urban Sprawl in Europe. , (EEA Report No: 11/2016), p.140.

Evins, R., Dorer, V. & Carmeliet, J., 2014. Simulating external longwave radiation exchange for buildings. *Energy and Buildings*, 75, pp.472–482.

Ewing, R., 2010. The Impact of Urban Form on U . S . Residential Energy Use. *Housing Policy Debate*, 19(April 2013), pp.37–41.

F

Fanger, P.O., 1972. *Thermal comfort: Analysis and applications in environmental engineering*, Copenhagen, Denmark: Danish Technical Press.

Faye, E., Dangles, O. & Pincebourde, S., 2016. Distance makes the difference in thermography for ecological studies. *Journal of Thermal Biology*, 56, pp.1–9.

Fishman, R., 1977. *Urban utopias in the twentieth century: Ebenezer Howard, Frank Lloyd Wright, and Le Corbusier*, Basic Books.

FLIR & Co., 2017. FLIR Customer Support Center. Available at: <http://flir.custhelp.com/app> [Accessed April 4, 2018].

- FLIR-Systems, 2018. FLIR Tools. Available at: <http://www.flir.com/instruments/display/?id=54865>.
- Fokaides, P.A. & Kalogirou, S.A., 2011. Application of infrared thermography for the determination of the overall heat transfer coefficient (U-Value) in building envelopes. *Applied Energy*, 88(12), pp.4358–4365.
- Fox, M. et al., 2012. Comparing transient simulation with thermography time series. In *First Building Simulation and Optimization Conference Loughborough*. pp. 356–363.
- Fox, M. et al., 2014. Thermography methodologies for detecting energy related building defects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 40, pp.296–310.
- Fox, M., Coley, D., Goodhew, S. & Wilde, P. De, 2015. Time-lapse thermography for building defect detection. *Energy & Buildings*, 92, pp.95–106.
- Fox, M., Coley, D., Goodhew, S. & De Wilde, P., 2015. Time-lapse thermography for building defect detection. *Energy and Buildings*, 92, pp.95–106.
- Fox, M.W., 2016. *Thermography approaches for building defect detection*. PhD Thesis, Plymouth University.
- De Freitas, S.S., De Freitas, V.P. & Barreira, E., 2014. Detection of façade plaster detachments using infrared thermography - A nondestructive technique. *Construction and Building Materials*, 70, pp.80–87.
- Fundación de la Energía de la Comunidad de Madrid, 2011. *Guía de la termografía infrarroja: aplicaciones en ahorro y eficiencia energética*, Madrid, España. Available at: <https://www.fenercom.com>.

G

- Garcia-Nevado, E. et al., 2015. Characterization of solar access in mediterranean cities: Oriented Sky Factor. In *PLEA 2015 – 31st Conference on Passive and Low Energy Architecture*. Bolonia, pp.1–7.
- Garcia-Nevado, E., Beckers, B., Coch, H., et al., 2017. Façade design and energy demand : fenestration indexes from an urban approach. In *PLEA 2017 - 33rd Conference on Passive and Low Energy Architecture*. Edinburgh, pp. 5230–5237.
- Garcia-Nevado, E., 2013. *Toldo urbano: Posibilidades de reducción de la demanda de refrigeración*. Tesis de Master, Universitat Politècnica de Catalunya.
- Garcia-Nevado, E., Beckers, B. & Coch, H., 2017. Characterization of façade fenestration for energy studies within the “Eixample” urban tissue of Barcelona. *Energy Procedia*, 122, pp.397–402.
- Garcia-Nevado, E. & Coch Roura, H., 2015. Urban canopy shading: opportunities to reduce cooling requirements. In P. Mercader Moyano, ed. *CICSE II International and IV National Congress on Sustainable Construction and Eco-Efficient Solutions*. Seville, Spain: Universidad de Sevilla, pp. 1113–1131.
- Garcia-Nevado, E., Pages-Ramon, A. & Coch, H., 2016. Solar access assessment for Mediterranean urban environments: the extent of the “crossing effect.” In *PLEA - 2016 - 32nd International Conference on Passive and Low Energy Architecture*. Los Angeles, pp. 1–6.

- García-Nevaldo, E., Pages-Ramon, A. & Coch, H., 2016. Solar access assessment in dense urban environments: The effect of intersections in an urban canyon. *Energies*, 9(10).
- Georgakis, C., Santamouris, M. & Kaisarli, G., 2010. The vertical stratification of air temperature in the center of Athens. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 49(6), pp.1219–1232.
- Ghandehari, M., Emig, T. & Aghamohamadnia, M., 2018. Surface temperatures in New York City: Geospatial data enables the accurate prediction of radiative heat transfer. *Scientific Reports*, 8(1), pp.1–10.
- González-Aguilera, D. et al., 2013. Image-based thermographic modeling for assessing energy efficiency of buildings façades. *Energy and Buildings*, 65, pp.29–36.
- González-Aguilera, D. et al., 2012. Novel approach to 3D thermography and energy efficiency evaluation. *Energy and Buildings*, 54, pp.436–443.
- Gordon, P. & Wong, H.L., 1985. The Costs of Urban Sprawl: Some New Evidence. *Environment and Planning A*, 17(5), pp.661–666.
- Grimmond, C.S.B., Cleugh, H. a. & Oke, T.R., 1991. An objective urban heat storage model and its comparison with other schemes. *Atmospheric Environment. Part B. Urban Atmosphere*, 25(3), pp.311–326.
- Grinzato, E., Vavilov, V. & Kauppinen, T., 1998. Quantitative infrared thermography in buildings. *Energy & Buildings*, 29.
- Gros, A., Bozonnet, E. & Inard, C., 2011. Modelling the radiative exchanges in urban areas: A review. *Advances in Building Energy Research*, 5(1), pp.163–206.

H

- Halawa, E., van Hoof, J. & Soebarto, V., 2014. The impacts of the thermal radiation field on thermal comfort, energy consumption and control—A critical overview. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 37, pp.907–918.
- Hamzah, A.R., 1996. *The Application of Transient Thermography to Defect Detection*. PhD Thesis, University of Bath.
- Harman, I.A.N.N., 2004. Radiative exchange in an urban street canyon. *Boundary Layer Meteorology*, 110, pp.301–316.
- Hart, J.M., 1991. *A practical guide to infra-red thermography for building surveys*, Walford.
- Higueras, E., 2006. *Urbanismo bioclimático*, Gustavo Gili.
- Holst, G.C., 2000. *Common sense approach to thermal imaging*, Bellingham, Washington USA: SPIE Publications.
- Howell, J.R., Siegel, R. & Pinar-Menguç, M., 2010. *Thermal Radiation Heat Transfer* Fifth edit., Taylor & Francis Group.

I

International Standardization Organization, 2002. *ISO 7726 2002: Ergonomics of the thermal environment—instruments for measuring physical quantities.*, Geneva, Switzerland.

J

Jacobs, J., 1993. *The Death and Life of Great American Cities*, New York: Vintage Books.

Jenks, M., Burton, E. & Williams, K., 1996. *The Compact City: A Sustainable Urban Form?* M. Jenks, E. Burton, & K. Williams, eds., Taylor & Francis Group.

Johnson, G.T. & Watson, I.D., 1983. The determination of View-Factors in Urban Canyons. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 23(2), pp.329–335.

K

Kántor, N. & Unger, J., 2011. The most problematic variable in the course of human-biometeorological comfort assessment - The mean radiant temperature. *Central European Journal of Geosciences*, 3(1), pp.90–100.

Kneizys, F.X. et al., 1988. User guide to LOWTRAN 7. In *Environmental Research Papers*. Hanscom, Mass (USA), p. 261 pp.

Kruczek, T., 2015. Use of infrared camera in energy diagnostics of the objects placed in open air space in particular at non-isothermal sky. *Energy*, 91, pp.35–47.

Kylili, A. et al., 2014. Infrared thermography (IRT) applications for building diagnostics: A review. *Applied Energy*, 134, pp.531–549.

L

Lagouarde, J.P. et al., 2010. Modelling daytime thermal infrared directional anisotropy over Toulouse city centre. *Remote Sensing of Environment*, 114(1), pp.87–105.

Lagüela, S. et al., 2012. Automation of thermographic 3D modelling through image fusion and image matching techniques. *Automation in Construction*, 27, pp.24–31.

Lagüela, S. et al., 2011. Energy efficiency studies through 3D laser scanning and thermographic technologies. *Energy and Buildings*, 43(6), pp.1216–1221.

Lam, W.M.C., 1986. *Sunlighting as Formgiver for Architecture*, New York: Van Nostrand Reinhold Company.

Landsberg, H.E., 1981. *The Urban climate*, New York: Academic Press.

- Lee, S. et al., 2018. Analyzing Thermal Characteristics of Urban Streets Using a Thermal Imaging Camera: A Case Study on Commercial Streets in Seoul, Korea. *Sustainability*, 10(2), p.519.
- Lehmann, B. et al., 2013. Effects of individual climatic parameters on the infrared thermography of buildings. *Applied Energy*, 110, pp.29–43.
- León Muñoz, A. & Blanco Guzmán, R.A., 2010. La fita y sus consecuencias. La revitalización urbana de Córdoba en época almohade. *Monografías de arqueología cordobesa*, 19.
- Lewis,] Roland W, Nithiarasu, P. & Seetharamu, K.N., 2004. *Fundamentals of the Element Method for Heat and Fluid Flow*, John Wiley & Sons.
- Lindberg, F., Holmer, B. & Thorsson, S., 2008. SOLWEIG 1.0 - Modelling spatial variations of 3D radiant fluxes and mean radiant temperature in complex urban settings. *International Journal of Biometeorology*, 52(7), pp.697–713.
- Liu, B.Y.H. & Jordan, R.C., 1960. The interrelationship and Characteristic Distributioin of direct, diffuse and total solar radiation. *Solar Energy*, 4, pp.1–19.
- Loveday, J. et al., 2017. Quantifying radiation from thermal imaging of residential landscape elements. *Renewable Energy and Environmental Sustainability*, 2, p.17.

M

- Madding, R., 2008. Finding R-Values of Stud Frame Constructed Houses with IR Thermography. In *Proceedings of InfraMation*. (Reno, USA).
- Maldague, X.P. V, 2002. Introduction to NDT by active infrared thermography. *Materials Evaluation*, 60(9), pp.1060–1073.
- Mardaljevic, J., 1999. *Daylight simulation: validation, sky models and daylight coefficients*. PhD Thesis, De Montfort University.
- Márquez Moreno, C., 2005. Córdoba romana : dos décadas de investigación arqueológica. *Mainake*, 27, pp.33–60.
- Mastrapostoli, E. et al., 2016. On the ageing of cool roofs: Measure of the optical degradation, chemical and biological analysis and assessment of the energy impact. *Energy and Buildings*, 114, pp.191–199.
- Meier, F. et al., 2011. Atmospheric correction of thermal-infrared imagery of the 3D urban environment acquired in oblique viewing geometry. *Atmospheric Measurement Techniques*, 4(5), pp.909–922.
- Mills, G. et al., 2010. Climate information for improved planning and management of mega cities (Needs Perspective). *Procedia Environmental Sciences*, 1(1), pp.228–246.
- Minkina, W. & Dudzik, S., 2009. *Infrared Thermography. Errors and Uncertainties*, Wiley.
- Mirsadeghi, M. et al., 2013. Review of external convective heat transfer coefficient models in building energy simulation programs : Implementation and uncertainty. *Applied Thermal Engineering*, 56(1-2), pp.134–151.

- Mohajeri, N. et al., 2016. Effects of urban compactness on solar energy potential. *Renewable Energy*, 93, pp.469–482.
- Moonen, P. et al., 2012. Urban Physics: Effect of the micro-climate on comfort, health and energy demand. *Frontiers of Architectural Research*, 1(3), pp.197–228.
- Muneer, T. et al., 2000. *Windows in buildings. Thermal, acoustic, visual and solar performance*, Oxford: Architectural Press.
- Murillo, J.F., 2008. Colonia Patricia Corduba hasta la dinastía flavia. Imagen urbana de una capital provincial. In *Coloquio: Simulacra Romae II*. pp. 71–94.
- Murillo, J.F. et al., 1997. Córdoba: 300-1236 D.C. Un milenio de transformaciones urbanas. In *Medieval Europe Brugge Conference*. pp. 47–60.

N

- Nahon, R., Blanpain, O. & Beckers, B., 2016. Impact of the anisotropy of the sky vault emissivity on the building envelope radiative budget. In B. Beckers, T. Pico, & S. Jimenez, eds. *FICUP_ First International Conference on Urban Physics*. Quito – Galápagos, Ecuador.
- Nardi, I., Sfarra, S. & Ambrosini, D., 2014. Quantitative thermography for the estimation of the U-value: State of the art and a case study. *Journal of Physics: Conference Series*, 547(1).
- Neuman, M., 2005. The Compact City Fallacy. *Journal of Planning Education and Research*, 25(1), pp.11–26.
- Newman, P., Beatley, T. & Boyer, H., 2009. *Resilient cities. Responding to the Peak Oil and Climate Change*, Washington, D. C. : Island Press.

O

- Oke, T.R., 1978. *Boundary layer climates*, New York: Routledge.
- Oke, T.R., 1988. Street design and urban canopy layer climate. *Energy and Buildings*, 11(1-3), pp.103–113.
- Oke, T.R. et al., 2017. *Urban Climates*, Columbia: Cambridge University Press.
- Oke, T.R., Kalanda, B.D. & Steyn, D.G., 1981. Parameterization of heat storage in urban areas. *Urban Ecology*, 5(1), pp.45–54.
- Olgay, V., 1963. *Design with climate: Bioclimatic approach to architectural regionalism*, New Jersey: Princeton University Press.
- Orihuela, A., 2007. La casa andalusí: un recorrido a través de su evolución. *Artigrama*, 22, pp.299–335.

P

- Palyvos, J.A., 2008. A survey of wind convection coefficient correlations for building envelope energy systems' modeling. *Applied Thermal Engineering*, 28.
- Paolini, R. et al., 2014. Assessment of Thermal Stress in a Street Canyon in Pedestrian Area with or without Canopy Shading. *Energy Procedia*, 48, pp.1570–1575.
- Paquot, T. ed., 2013. *Repenser l'urbanisme*, INFOLIO.
- Pearlmutter, D., Bitan, A. & Berliner, P., 1999. Microclimatic analysis of "compact" urban canyons in an arid zone. *Atmospheric Environment*, 33(24-25), pp.4143–4150.
- Pérez-Ordóñez, A., 2010. Arquitectura tardo-andalusí y morisca. *Identidad Andaluza · Historia, cultura y actualidad andaluza*. Available at: <http://hdl.handle.net/10261/34537>.
- Phan, L.N., 2012. *Automated rapid thermal imaging systems technology*. MIT - Massachusetts Institute of Technology.
- Pont, M.B. & Haupt, P., 2010. *Spacematrix: space, density and urban form*,
- Pontet, J. & Bériac, F., 1992. La croissance de Bayonne. *Revue géographique des Pyrénées et du Sud-Ouest*, 63(Histoire de Bayonne), pp.558–561.
- Pontet-Fourmigué, J., 1990. *Bayonne, un destin de ville moyenne à l'époque moderne* Desclée de Brouwer, ed., J&D Editions.

R

- Radiance Community, 2004. RADSITE| Radiance on-line.org. Available at: <https://www.radiance-online.org/> [Accessed August 18, 2018].
- Ratti, C., Baker, N. & Steemers, K., 2005. Energy consumption and urban texture. *Energy and Buildings*, 37(7), pp.762–776.
- Real Estate Research Corporation, 1974. The costs of sprawl: Environmental and economic costs of alternative residential development patterns at the urban fringe. *Portland Regional Planning History*, (Paper 26).
- Reba, M., Reitsma, F. & Seto, K.C., 2016. Spatializing 6,000 years of global urbanization from 3700 BC to AD 2000. *Scientific Data*, 3, pp.1–16.
- Reinhart, C.F. & Walkenhorst, O., 2001. Validation of dynamic RADIANCE-based daylight simulations for a test office with external blinds. *Energy and Buildings*, 33, pp.683–697.
- Ring, E.F.J., 2000. The discovery of infrared radiation in 1800. *The Imaging Science Journal*, 48(1), pp.1–8.
- Robinson, D., 2006. Urban morphology and indicators of radiation availability. *Solar Energy*, 80(12), pp.1643–1648.

Rode, P. et al., 2014. Accessibility in Cities: Transport and Urban Form. *London School Economics Cities*, (Working Paper 03), pp.239–273.

Rojas-Fernández, J. et al., 2017. Correlations between GIS-based urban building densification analysis and climate guidelines for Mediterranean courtyards. *Sustainability (Switzerland)*, 9(12).

S

Salvati, A., 2016. *La città compatta in clima Mediterraneo: isola di calore, morfologia e sostenibilità*. PhD Thesis, La Sapienza di Roma - Univesidad Politécnica de Cataluña.

Santamouris, M. et al., 2017. Passive and active cooling for the outdoor built environment – Analysis and assessment of the cooling potential of mitigation technologies using performance data from 220 large scale projects. *Solar Energy*, 154, pp.14–33.

Santamouris, M. et al., 1999. Thermal and air flow characteristics in a deep pedestrian canyon under hot weather conditions. *Atmospheric Environment*, 33(27), pp.4503–4521.

Serra Florensa, R., 1999. *Arquitectura y climas* Gustavo Gili, ed.,

Serra, R. & Coch, H., 2009. *Arquitectura y energía natural*, Edicions UPC. Available at: <https://books.google.es/books?id=zIXwBRY-mWsC>.

Shao, E.C., 2011. *Detecting Sources of Heat Loss in Residential Buildings from Infrared Imaging*. MIT - Massachusetts Institute of Technology.

Shashua-Bar, L., Pearlmutter, D. & Erell, E., 2011. The influence of trees and grass on outdoor thermal comfort in a hot-arid environment. *International Journal of Climatology*, 31(10), pp.1498–1506.

SISIFO, G. de I. de la U. de C., 2018. ArqueoCórdoba. Available at: <http://www.arqueocordoba.com/> [Accessed May 7, 2018].

Southworth, M. & Ben-Joseph, E., 1997. *Streets and the shaping of towns and cities*, Nueva York: McGraw-Hill.

Stemmers, K., 2003. Energy and the city: density, buildings and transport. *Energy and Buildings*, 35(1), pp.3–14.

Strømmand-Andersen, J. & Sattrup, P. a, 2011. The urban canyon and building energy use: Urban density versus daylight and passive solar gains. *Energy and Buildings*, 43(8), pp.2011–2020.

T

Tamura, T. et al., 2001. Developing the capturing system of spherical thermograph and applications to built environment. In A. E. Rozlosnik & R. B. Dinwiddie, eds. *Proceedings of SPIE Conference on Thermosense*. pp. 169–176.

Thorsson, S. et al., 2007. Different methods for estimating the mean radiant temperature in an outdoor urban setting. *International Journal of Climatology*, 27, pp.1983–1993.

- TIDOP, 2012. PW Software: Photogrammetry Workbench. Available at: <http://tidop.usal.es/programas> [Accessed September 9, 2018].
- Tombolini, I. et al., 2015. Revisiting “Southern” Sprawl: Urban Growth, Socio-Spatial Structure and the Influence of Local Economic Contexts. *Economies*, 3(4), pp.237–259.
- Tregenza, P. & Waters, I., 1983. Daylight coefficients. *Lighting Research & Technology*, 15, pp.65–71.
- Tsai, Y.H., 2005. Quantifying urban form: Compactness versus “sprawl.” *Urban Studies*, 42(1), pp.141–161.

U

- Unger, J., 2004. Intra-urban relationship between surface geometry and urban heat island : review and new approach. *Climate Research*, 27, pp.253–264.
- United Nations, 2014. *World Urbanization Prospects, the 2014 Revision*,
- United Nations, 2011. *Cities and Climate Change; global report on human settlements, 2011*, London: United Nations - Human Settlements Programme.
- UN-Habitat, 2011. Urban Trends: Urbanization and Economic Growth. *Cross-currents in Global Urbanization*, p.2.
- United Nations Commission, 1987. *Our Common Future: Report of the World Commission on Environment and Development (Brundtland Report)*,
- Universidad de Salamanca, 2018. Grupo de Investigación TIDOP. Available at: <http://tidop.usal.es/grupo> [Accessed September 7, 2018].
- Usamentiaga, R. et al., 2014. Infrared Thermography for Temperature Measurement and Non-Destructive Testing. *Sensors*, 14(7), pp.12305–12348.

V

- Vaquerizo, D. & Murillo, J.F., 2010. Ciudad y suburbia en Corduba. Una visión diacrónica (siglos II aC. – VII dC.). In *Las áreas suburbanas de la ciudad histórica. Topografía, usos, función*. pp. 455–522.
- Ventura Villanueva, Á., 2002. Los acueductos romanos de Córdoba y su rehabilitación omeya. *Empúries*, (53), pp.113–128.
- Vollmer, M. & Möllmann, K.P., 2010. *Infrared Thermal Imaging. Fundamentals, Research and Applications.*, Weinheim: Wiley.
- Voogt, J. a. & Oke, T.R., 1997. Complete Urban Surface Temperatures. *Journal of Applied Meteorology*, 36(9), pp.1117–1132.
- Voogt, J.A. & Oke, T.R., 2003. Thermal remote sensing of urban climates. *Remote Sensing of Environment*, 86(3), pp.370–384.

W

Ward Larson, G. & Shakespeare, R., 1998. *Rendering with RADIANCE: The Art and Science of Lighting Visualization*, San Francisco: Morgan Kaufmann Publishers, Inc.

Weng, Q., 2009a. Thermal infrared remote sensing for urban climate and environmental studies: Methods, applications, and trends. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 64(4), pp.335–344.

Weng, Q., 2009b. Thermal infrared remote sensing for urban climate and environmental studies: Methods, applications, and trends. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 64(4), pp.335–344.

Windsor, D., 1979. A Critique of The costs of sprawl. *Journal of the American Planning Association*, 45(3), pp.279–292.

BIBLIOGRAFÍA

LISTADO DE FIGURAS Y TABLAS

INTRODUCCIÓN

<i>Figura 1. Ejemplos de estrategias arquitectónicas vernaculares (Coch 1998)</i>	13
<i>Figura 2. Metodología de investigación</i>	19

INTRODUCTION

<i>Figure 1. Examples of vernacular strategies in architecture (Coch 1998)</i>	23
<i>Figure 2. Research methodology</i>	29

CAPÍTULO 1

<i>Figura 1. 1. Urban sprawl en la ciudad de Londres frente a la ciudad compacta de Nueva York</i>	33
<i>Figura 1. 2. Broadacre City de Wright (izquierda) y la Ville Radieuse de Le Corbusier (derecha)</i> ..	35
<i>Figura 1. 3. Ville contemporaine de trois millions d'habitants (LeCorbusier, 1922) frente a la Ville Nouvelle à Sarcelles, en 1961</i>	36
<i>Figura 1. 4. Cuatro indicadores de densidad correlacionados por Pont & Haupt (2010) para caracterizar un tejido urbano</i>	39
<i>Figura 1. 5. Ejemplo abstracto de formas monocéntricas, policéntricas y descentralizadas del Urban Sprawl (Tsai 2005)</i>	39
<i>Figura 1. 6. Reflexión sobre la densidad del centro histórico de la ciudad de Bayona a diferentes escalas</i>	40
<i>Figura 1. 7. Mapas de usos del suelo en Barcelona, Roma y Atenas (Tombolini et al. 2015)</i>	41
<i>Figura 1. 8. Proceso de degradación de la trama urbana en Hazelridge, al Noreste de Detroit entre 2002 y 2015</i>	43
<i>Figura 1. 9. Relación entre densidad urbana e intensidad de uso de distintos medios de transporte (Burdett & Sudjic 2011)</i>	45
<i>Figura 1. 10. Rad. solar promedio diaria incidente sobre cañones con distinta sección (Strømman-Andersen & Sattrup 2011)</i>	46
<i>Figura 1. 11. Relación entre compacidad de varios tejidos de Ginebra y radiación solar incidente (Mohajeri et al. 2016)</i>	46
<i>Figura 1. 12. Demanda de calefacción y refrigeración para tejidos con diferente densidad en Barcelona (Salvati 2016)</i>	47
<i>Figura 1. 13. Factores de vista de cielo sobre el suelo para diferentes cañones (Johnson & Watson 1983)</i>	48
<i>Figura 1. 14. Factores de vista entre las distintas superficies de un cañón urbano en función de su relación de aspecto en escala natural (arriba) y logarítmica (abajo)</i>	49
<i>Figura 1. 15. Latitud de las tramas compactas estudiadas</i>	50
<i>Figura 1. 16. Ortofoto de Córdoba a distintas escalas en 2018. (Elab. propia a partir de Google Earth Pro)</i>	51
<i>Figura 1. 17. Posible reconstrucción de la imagen original del teatro Romano y estado actual de la plaza y escaleras anexas al teatro romano, hoy integradas en el Museo Arqueológico de Córdoba. Fuente: (Márquez Moreno 2005)</i>	52
<i>Figura 1. 18. Localización y extensión de la Corduba tartesio-turdetana y de la Corduba fundada por M. Claudio Marcelo en el 150 a.C. y su superposición sobre la trama actual de Córdoba (Elab. Propia, a partir de Murillo 2008)</i>	53
<i>Figura 1. 19. Extensión aproximada de los barrios suburbanos entre el siglo III y IV y su superposición sobre la trama actual de Córdoba (Elab. Propia a partir de los planos de http://www.arqueocordoba.com)</i>	53
<i>Figura 1. 20. Extensión de Córdoba entre el s. IX y el s. XII (SISIFO 2018)</i>	55
<i>Figura 1. 21. Continuidad entre el trazado viario romano, musulmán y cristiano en Córdoba. De izquierda a derecha: Trazado romano y sus vías territoriales (SISIFO 2018); Vías principales del trazado musulmán en relación a las puertas de la muralla (Escobar Camacho 1987); Reconstrucción del trazado urbano a la llegada de Fernando III (SISIFO 2018)</i>	57
<i>Figura 1. 22. Sección transversal promedio de la Calle de las Rejas de Don Gome de Córdoba</i>	58
<i>Figura 1. 23. Ortofoto de Bayona a distintas escalas en 2018. (Elab. propia a partir de Google Earth Pro)</i>	59
<i>Figura 1. 24. Reconstrucción de la evolución urbana de Bayona entre el s.XI u el XVII (Elab. propia a partir de (Bohaca & Bolumburu 2016)</i>	61
<i>Figura 1. 25. Desplazamiento de la desembocadura del río Adour (En: Bohaca & Bolumburu 2016)</i>	62
<i>Figura 1. 26. Evolución en altura de las viviendas en Bayona (Reelaboración de (Duplantier & Contamin 2012)</i>	63
<i>Figura 1. 27. Ilustraciones sobre el cambio de la volumetría urbana de Bayona. (Duplantier & Contamin 2012)</i>	64
<i>Figura 1. 28. Extracto de actuaciones del Plan de Sauvegarde del Petit Bayonne (Mairie de Bayonne)</i>	65
<i>Figura 1. 29. Sección transversal promedio de la Rue des Tonneliers de Bayonne</i>	65
<i>Tabla 1. 1. Comparación de características de los modelos de ciudad compacta y dispersa (Neuman 2005)</i>	37

CAPÍTULO 2

Figura 2. 1. Coeficientes de convección exterior en superficies horizontales y verticales según Vviento (Erell et al. 2011).....	72
Figura 2. 2. Propiedades térmicas de materiales naturales de entornos rurales y de materiales de la construcción de entornos urbanos (Oke et al. 2017).....	74
Figura 2. 3. Variación del calor almacenado ΔQ_S normalizado por la el Balance Radiativo Neto Q^* en el ciclo de histéresis entre ambas variables para cuatro configuraciones urbanas (Oke et al. 2017).	74
Figura 2. 4. Radiación reflejada sobre fachada. Fotografía tomada por V. Olgay En: (Lam 1986).....	76
Figura 2. 5. Componentes simplificados de la radiación infrarroja medida por la cámara.	78
Figura 2. 6. Componentes detallados de la radiación infrarroja medida por la cámara.	80
Figura 2. 7. Parámetros a introducir en el software comercial (ej. de Flir Tools).....	82
Figura 2. 8. Extracto de la matriz de análisis del estado del arte sobre termografía en ambientes construidos.....	84
Figura 2. 9 Promedio de temperaturas en 24h obtenido a partir de termografías cada minuto y fotografía del área de estudio de Berlín en el trabajo de (Meier et al. 2011)	86
Figura 2. 10. Comparativa de la imagen de la nube de puntos colorizada según reflectancias obtenida de TSL, el mapa de desplazamientos relativo sobre el plano de referencia y la termografía de una iglesia (Costanzo et al. 2014).....	92
Figura 2. 11. Termografía esférica de un ambiente exterior arbolado (Tamura et al. 2001).	92
Figura 2. 12. Análisis 2D del campo de temperaturas en una carpintería en FLUENT (Asdrubali et al. 2012).....	93
Figura 2. 13. Mapa de temperaturas y emisividad abajo de un área urbana de Nueva York (Ghandehari et al. 2018). .	94
Figura 2. 14. Esquema en planta y alzado del área abarcada en una termografía en la dirección normal a la fachada realizada desde la posición 1 en la Rue des Tonneliers de Bayona	96
Figura 2. 15. Esquema en planta y alzado del área abarcada en una termografía en la dirección normal a la fachada realizada desde la posición 2 en la Rue des Tonneliers de Bayona	97
Figura 2. 16. Esquema en planta y alzado del área abarcada en una termografía en la dirección rasante a la fachada realizada desde la posición 3 en la Rue des Tonneliers de Bayona	97
Figura 2. 17. Esquema en planta y alzado del área abarcada en una termografía en la dirección rasante a la fachada realizada desde la posición 4 en la Rue des Tonneliers de Bayona	98
Figura 2. 18. Fotografías de la Rue des Tonneliers y gráficos sobre el ángulo y la distancia de observación entre la cámara IR y las superficies de modelo 3D de la calle desde un enfoque frontal, intermedio y rasante (posiciones 1, 3 y 4).....	101
Figura 2. 19. Comportamiento genérico de la emisividad de los materiales según el ángulo de observación (Fuente: Vollmer 2010).	103
Figura 2. 20. Distribución angular de la radiancia L de una superficie emisora en función del ángulo de un cuerpo negro, un cuerpo gris y una superficie real de tipo no conductor (De: Vollmer 2010).....	103
Figura 2. 21. Ley de Stefan Boltzmann y su aplicación simplificada a la termografía.	104
Figura 2. 22. Termografía de cubos de aluminio calentados a una temperatura uniforme (De: Vollmer 2010)	105
Figura 2. 23. Visión termográfica nocturna de la ciudad de Bayona reflejada sobre el río Nive	106
Figura 2. 24. Termografías en la dirección rasante (1) y normal (2) de una hoja de papel.	107
Figura 2. 25. Muestras de hormigón analizadas: pieza con textura lisa (izquierda) y rugosa (derecha).	108
Figura 2. 26. Diseño de la instalación experimental de medición.	109
Figura 2. 27. Imágenes de la campaña de medición termográfica en laboratorio.	109
Figura 2. 28. Termografías de la muestra lisa (arriba) y rugosa (abajo) de hormigón analizadas vistas bajo un ángulo de observación de 0o, 60o and 85o.	110
Figura 2. 29. Diferencial entre la temperatura medida por los termopares (TK) y por la cámara IR (TIR)	112
Figura 2. 30. Termografías en la dirección rasante (1) y normal (2) de una hoja de papel.	113
Figura 2. 31. Posición de las cámaras termográficas y visión del edificio objeto del estudio desde dicha posición en el modelo 3D del entorno de la Rue Tonneliers (Petit Bayonne).	115
Figura 2. 32. Visión del edificio objeto del estudio en el modelo 3D, fotografía y termografía, desde un enfoque tangencial (cámara A, arriba) y frontal (cámara B, abajo).	116
Figura 2. 33. Temperatura promedio de la zona de análisis desde un enfoque en tangencial (cámara A, azul) y frontal (cámara B, amarillo). Nótese que, entre las 15:00 y las 19:00, no se dispone de termografías válidas desde la cámara A.	117
Figura 2. 34. Termografías del edificio-objeto de la segunda campaña de medición de la Rue des Tonneliers de Bayonne desde las cámaras A y B: 4:00h ST del 8/05/2017.	118
Figura 2. 35. Termografías del edificio-objeto de la segunda campaña de medición de la Rue des Tonneliers de Bayonne desde las cámaras A y B: 14:00h ST del 8/05/2017.	118
Figura 2. 36. Factor de vista fachada-cielo (SVF), fachada-fachadas (BVF) y fachada-suelo (GVF)	119

Tabla 2. 1. Formas de energía y modos de intercambio en el sistema Tierra - Aire	70
Tabla 2. 2. Promedio de temperaturas superficial medidas por los termopares (TK) y por la cámara IR (TIR) para la muestra de hormigón rugosa y lisa.	111

CAPÍTULO 3

Figura 3. 1. Ejemplo de termografía de fachadas en entorno urbano poco denso. Campus de la Universidad de Plymouth. Fuente: (Fox et al. 2014).....	125
Figura 3. 2. Esquema de la metodología de análisis.....	126
Figura 3. 3. Termografías realizadas desde un mismo punto de medición con cámaras de diferentes campo de visión (FOV) Fuente: (Vollmer & Möllmann 2010)	128
Figura 3. 4. Termografías con igual campo de visión (FOV) y diferente resolución IR: 1024 x 1024 (izquierda) 80 x 80 (derecha). Fuente: (Vollmer & Möllmann 2010).....	128
Figura 3. 5. Nivel de detalle refinado para un edificio residencial según Biljecki et al. (2016).	131
Figura 3. 6. Ejemplo de tarjeta de referencia empleada para la medición.	134
Figura 3. 7. Flujo de trabajo para el procesamiento de datos de temperatura superficial.....	136
Figura 3. 8. Ejemplo de secuencia termográfica con escala común de cañón urbano, donde los pixeles fuera de rango se dejan en blanco.	138
Figura 3. 9. Ejemplo de termografía con escala de temperatura individual de escena urbana completa.	138
Figura 3. 10. Ejemplo de escena urbana coloreada según el diferencial de temperatura entre las superficies y el aire.	139
Figura 3. 11. Flujo de trabajo para el análisis de temperaturas superficiales de una región de interés.....	140
Tabla 3. 1. Calibración de parámetros a realizar en todas las imágenes.	137

CAPÍTULO 4

Figura 4. 1. Planta y sección de los cañones urbanos estudiados en Bayona (arriba) y en Córdoba (abajo).....	146
Figura 4. 2. Vista del extremo de la Rue des Tonneliers desde la ribera del río Nive.....	148
Figura 4. 3. Orto-imágenes de la Rue des Tonneliers a diferentes escalas, en Bayona (Francia).	148
Figura 4. 4. Vista de la Rue des Tonneliers desde el eje de la calle y desde las arcadas laterales (izquierda) y de la fachada Sur en el extremo Oeste de la calle (derecha).....	149
Figura 4. 5. Sección transversal promedio de la Rue des Tonneliers.....	150
Figura 4. 6. Modelo CAD interactivo del Petit Bayonne en su zona más próxima a la Rue des Tonneliers, realizado por la doctoranda en colaboración con los alumnos de “Física Urbana” de la ISA-BTP de Anglet (2017).	150
Figura 4. 7. Comparación del BVF de la fachada Sur de la Rue des Tonneliers con la del cañón urbano infinito con las proporciones de la Figura 4.5.	151
Figura 4. 8. Factores de vista entre la fachada Sur y el resto de superficies del cañón: cielo, fachada Norte y Pavimento.....	152
Figura 4. 9. Ilustración de la fachada Sur de la Rue des Tonneliers (Duplantier & Contamin 2012).....	153
Figura 4. 10. Valores individuales y promedio de los coef. de reflectividad de la Rue des Tonneliers.	153
Figura 4. 11. Alzados y planta con los coeficientes de reflexión asignados al modelo 3D de la Rue des Tonneliers.....	154
Figura 4. 12. Disposición de los equipos de medición en Rue des Tonneliers y distancia a la estación meteorológica.	155
Figura 4. 13. Temperatura del aire y humedad relativa durante la medición en la Rue des Tonneliers (23/04/2017).	156
Figura 4. 14. Velocidad del viento (m/s) durante la medición en la Rue des Tonneliers (23/04/2017).	156
Figura 4. 15. Irradiancia horizontal (W/m ²) medida en la estación Meteorológica de Nobatek (23/04/2017).	157
Figura 4. 16. Irradiancia horizontal (W/m ²) medida (23/04/2017) y calculada según el modelo de Liu Jordan para cielo despejado (23/04 en Bayona).	157
Figura 4. 17. Irradiancia sobre plano vertical a Sur, Norte y Oeste (W/m ²) calculada según el modelo de Liu Jordan para cielo despejado (23/04 en Bayona).	158
Figura 4. 18. Radiación solar acumulada (W/m ² día) calculada para el 23 de abril sobre planos horizontal y vertical sin obstrucción (Sur/Oeste/Norte) diferenciando el % de contribución directa (D) de difusa (d).	158
Figura 4. 19. Segmentación de las regiones de interés de la escena urbana estudiada en la Rue des Tonneliers.....	160
Figura 4. 20. Extracto de la secuencia de imágenes visibles y termográficas de la campaña de mediciones de la Rue des Tonneliers (23/04/2017).	161
Figura 4. 21. Radiación acumulada desde la salida del sol hasta las 14:00h ST (calculada con HELIODON 2 (Beckers & Masset 2006) y Temperatura superficial aparente medida sobre la termografía a las 14:00h.....	162

Figura 4. 22. Temperatura aparente de las superficies y del cielo a las 04:30 ST (23/04/2017), representada mediante una doble escala de color.	163
Figura 4. 23. Distribución de SVF en fachada y termografía desde la Rue Pontrique a las 04:00 ST (08/05/2017).	164
Figura 4. 24. Relación entre temperatura superficial aparente y SVF en cuatro puntos de fachada de la Rue Pontrique, a las 04:00 ST (08/05/2017).	164
Figura 4. 25. Extracto de la secuencia de imágenes sobre el diferencial de temperatura superficie-aire (Rue des Tonneliers del 23/04/17).	166
Figura 4. 26. Valores extremos (línea fina) y rango entre los percentiles 5 y 95 (línea gruesa) de las temperaturas superficiales aparentes, para las 5 áreas de interés correspondientes a elementos construidos.	168
Figura 4. 27. Termografías con elementos temporales no arquitectónicos.	169
Figura 4. 28. Promedio y rango corregido de temperaturas superficiales en las fachadas Sur, Norte y Oeste de la Rue des Tonneliers de Bayona (23/04/2017).	170
Figura 4. 29. Promedio y rango corregido de T^a sup. en el pavimento de la Rue des Tonneliers de Bayona.	171
Figura 4. 30. Promedio y rango corregido de T^a sup. de la parte visible de las cubiertas de la Rue des Tonneliers de Bayona (23/04/2017).	172
Figura 4. 31. Promedio y rango corregido de temperaturas superficiales en la parte visible del cielo de la Rue des Tonneliers de Bayona (23/04/2017).	173
Figura 4. 32. Temperaturas del cielo en función del ángulo de elevación con respecto al horizonte. Comparación entre mediciones a las 12:00 en la Rue des Tonneliers (azul) y referencia de Kruczek 2015 (gris).	174
Figura 4. 33. Imágenes aéreas a diferentes escalas de la Calle de las Rejas de Don Gome en la ciudad de Córdoba. ..	177
Figura 4. 34. Fachada Sur (izquierda) y Norte de la Calle de las Rejas de Don Gome (22/02/18).	178
Figura 4. 35. Panorámica de la intersección de la Calle de las Rejas de Don Gome con la Calle Enrique Redel	178
Figura 4. 36. Sección transversal promedio de la Calle de la Reja de Don Gome	179
Figura 4. 37. Modelo 3D interactivo CAD de la Calle de las Rejas de Don Gome (Córdoba).	180
Este modelo se utilizó con una doble finalidad. Por un lado, para calcular los factores de vista entre las fachadas y el resto de las superficies de la escena urbana se calculó por medio del software HELIODON 2 (Beckers & Masset 2006). Se analizaron mapas de distribución de los factores de vista y también se cuantificaron valores en ciertos puntos de interés. Por otro lado, se llevaron a cabo simulaciones de radiación en ondas cortas, teniendo en cuenta las componentes directa del sol, difusa del cielo y reflejada del entorno, en el software RADIANCE (Ward Larson & Shakespeare 1998). Los resultados de ambos análisis se mostrarán en posteriores apartados. 4. 38.	
Figura 4. 39. Época de construcción de los edificios de la escena urbana de la Calle de las Rejas de Don Gome.	181
Figura 4. 40. Resumen numérico y gráfico de los coeficientes de reflectividad de la Calle Rejas de Don Gome.	182
Figura 4. 41. Alzados y planta con los coeficientes de reflexión asignados al modelo 3D de la Calle de las Rejas de Don Gome.	183
Figura 4. 42. Disposición de los equipos de medición en la Calle de las Rejas de Don Gome y distancia a la estación meteorológica de referencia.	184
Figura 4. 43. Temperatura del aire y humedad relativa durante la medición en la Calle Rejas de Don Gome (25/07/2017).	185
Figura 4. 44. Velocidad del viento (m/s) durante la medición en la Calle Rejas de Don Gome (25/07/2017).	185
Figura 4. 45. Irradiancia horizontal (W/m ²) medida en la estación meteorológica del Aeropuerto (25/07/2017).	186
Figura 4. 46. Irradiancia horizontal (W/m ²) medida en el Aeropuerto de Córdoba (25/07/2017) y calculada según el modelo de Liu Jordan para cielo despejado (25/07 en Córdoba).	186
Figura 4. 47. Irradiancia sobre plano vertical a Sur, Norte y Oeste (W/m ²) calculada según el modelo de Liu Jordan para cielo despejado (25/07 en Córdoba).	187
Figura 4. 48. Radiación solar difusa (d) y directa (D) calculada el 25 de julio en Córdoba sobre planos horizontal y vertical sin obstrucción (Sur-15o/ Norte-15o / Oeste-15o).	187
Figura 4. 49. Segmentación en regiones de interés y puntos de estudio de la escena urbana en la Calle Rejas de Don Gome.	189
Figura 4. 50. Extracto de la secuencia de imágenes visibles e infrarrojas de la campaña de medición en la Calle de las Rejas de Don Gome (25/07/2017).	194
Figura 4. 51. Fotografía y termografía de las fachadas de la Calle Rejas de Don Gome a las 04:00 ST (25/07/2017).	196
Figura 4. 52. Fotografía y termografía de las fachadas de la Calle Rejas de Don Gome a las 10:30 ST (25/07/2017).	196
Figura 4. 53. Extracto de la secuencia de imágenes sobre el diferencial de temperatura superficie-aire (Calle de las Rejas de Don Gome, 25/07/17).	198
Figura 4. 54. Temperaturas superficiales de los puntos de estudio de la fachada Norte en relación a la temperatura del aire.	200

Figura 4. 55. Temperaturas superficiales de los puntos de estudio de la fachada Sur, en relación a la temperatura del aire.....	200
Figura 4. 56. Radiación solar incidente simulada sobre el los puntos de estudio de la fachada Sur y la Norte y en el mismo plano sin obstrucción durante el 25 de julio (Wh/m ² día).....	201
Figura 4. 57. Radiación global incidente y absorbida (W/m ²) en los puntos de estudio de las fachadas Norte y Sur. (Radiación absorbida calculada multiplicando la radiación incidente simulada por el coef. de absorción α de cada punto, $(\alpha = 1 - r)$).....	202
Figura 4. 58. Radiación absorbida comparada y temperatura superficial en los puntos de estudio a menor altura de la fachada Sur (S3) y de la Norte (N3).....	203
Figura 4. 59. Temperatura Superficial en función del SVF en los puntos de estudio de las fachadas Norte-Sur a las 04:00 ST.	204
Figura 4. 60. Temperaturas superficiales de los puntos de estudio del pavimento en relación a la temperatura del aire.	205
Figura 4. 61. Flujo solar total incidente y absorbido (W/m ²) en los puntos de estudio del pavimento.	206
Figura 4. 62. Radiación solar incidente simulada sobre el los puntos de estudio del pavimento y en el mismo plano sin obstrucción durante el 25 de julio (Wh/m ² día).....	207
Figura 4. 63. Temperatura superficial aparente promedio y rango de la parte de cielo visible en la escena termografiada en relación a las del aire.	208
Figura 4. 64. Estimación de temperaturas del cielo en función del ángulo de elevación con respecto al horizonte a las 05:00 en Calle de las Rejas de Gome (azul) tomando como base la referencia bibliográfica de Kruczek 2015 (gris).	209
Figura 4. 65. Gradiente de temperatura del cielo en relación a la temperatura del cenit en situación sin obstrucciones y en el caso de un punto de fachada (N1) y de un punto del pavimento (P3).....	210
Figura 4. 66. Balance radiativo en LW y Total en el punto N1.....	212
Figura 4. 67 Balance radiativo en LW y Total en el punto N3.....	212
Figura 4. 68 Reflectividad del alzado Sur de la Rue des Tonneliers y de la Calle de las Rejas de Don Gome.	216
Figura 4. 69 Diferencial de Temperaturas Superficie-Aire a las 14:00 ST en la Rue des Tonneliers de Bayona el 23/04/2017 y de la Calle de las Rejas de Don Gome de Córdoba el 25/07/2017.....	217
Tabla 4. 1. Parámetros utilizados para la calibración de termografías en la Rue des Tonneliers.	159
Tabla 4. 2. Parámetros de calibración de termografías en el Caso de Estudio de la Calle Rejas de Don Gome.	188
Tabla 4. 3. Caracterización material y geométrica de los puntos de estudio de la fachada Sur.....	190
Tabla 4. 4. Caracterización material y geométrica de los puntos de estudio de la fachada Norte.....	191
Tabla 4. 5. Caracterización material y geométrica de los puntos de estudio del pavimento.....	192
 CAPÍTULO 5	
Figura 5. 1. Imágenes de toldos urbanos: c/Trapería en Murcia ,1905; C/Sierpes de Sevilla, 1918, c/Preciados y c/Arenal en Madrid, 2018.....	221
Figura 5. 2. Fotografía y termografía de un modelo a escala de entorno urbano entoldado a las 12:20 LST del 17/07/2007 en Negev, Israel (Shashua-Bar et al. 2011).	222
Figura 5. 3. Esquema del modelo geométrico empleado en las simulaciones.	223
Figura 5. 4. Importancia relativa de las variables estudiadas sobre la efectividad del toldo.	224
Figura 5. 5. Disminución de demanda de refrigeración según proporción W/H por orientaciones.	224
Figura 5. 6. Disminución de demanda de refrigeración según %WWR por orientaciones en una calle W/H=1.	225
Figura 5. 7. Disminución de demanda de refrigeración según la obstrucción solar del toldo, por orientaciones en una calle W/H=1.....	225
Figura 5.8. Superficie de toldos en la temporada 2018 (color sólido) y previsión para la próxima (rayado).....	228
Figura 5.9. Imágenes aéreas de las dos áreas urbanas entoldadas del centro peatonal de Córdoba formadas por calles Este-Oeste e información geométrica sobre las mismas.....	229
Figura 5.10. Imágenes aéreas de las dos áreas urbanas entoldadas del centro peatonal de Córdoba formadas por calles Norte-Sur e información geométrica sobre las mismas.	230
Figura 5. 11. Imágenes de las muestras de toldos y escenarios urbanos entoldados estudiados experimentalmente.	231
Figura 5. 12. Resultados de tests experimentales sobre muestras y entorno real para la caracterización de los toldos y zonas en las que dichos tejidos se encuentran instalados.	232
Figura 5. 13. Horas de interés y temporalización de la toma de imágenes para la campaña de medición realizada en Córdoba el día 08/07/2018.	233
Figura 5. 14. Localización de las áreas y puntos de medición de la campaña de medición realizada en Córdoba (08/07/2018).....	234

Figura 5. 15. Temperatura del aire registrada en las zonas de medición y en la Est. Meteo. del Aeropuerto (08/07/2018).....	235
Figura 5. 16. Humedad Relativa registrada en las zonas de medición y en la Est. Meteo. del Aeropuerto (08/07/2018).	235
Figura 5. 17. Velocidad del aire medida en las zonas de medición y en la Estación Meteorológica del Aeropuerto.	236
Figura 5. 18. Radiación en onda corta y larga sobre plano horizontal medida en el Aeropuerto de Córdoba (08/07/2018).....	236
Figura 5. 19. Pixeles eliminados en los bordes de cada escena y porcentaje de información conservada sobre la contenida en la imagen de 240 x 320 px.....	237
Figura 5. 20. Extracto de las secuencias de termografías y fotografías en los puntos EO3 y NS1.	239
Figura 5. 21. Radiación solar sobre el pavimento de la zona EO123 el día 08 de Julio (kWh/m ² día). Simulación realizada en HELIODON 2, teniendo en cuenta sólo la componente directa bajo condiciones de cielo despejado.....	242
Figura 5. 22. Temperatura del pavimento en la escena EO2 entre las 11:00 y las 13:00 ST.	243
Figura 5. 23. Puntos del pavimento de la escena EO2 seleccionados sobre el eje de la calle.	244
Figura 5. 24. Evolución de la Temperatura superficial aparente de puntos seleccionados del pavimento de la escena EO2 (arriba). Diferencia de temperatura entre los puntos al sol en la calle y la sombra (abajo).....	245
Figura 5. 25. Evolución de la Temperatura superficial aparente de puntos seleccionados del pavimento de la escena EO2 (arriba). Diferencia de temperatura entre los puntos al sol en el cruce y la sombra (abajo)	246
Figura 5. 26. Radiación solar sobre el pavimento de la zona NS34 con y sin toldo el día 08 de Julio (kWh/m ² día). Simulación en HELIODON 2, considerando sólo la componente directa, un cielo despejado y un toldo con una obstrucción del 100%.	247
Figura 5. 27. Temperatura del pavimento en los puntos seleccionados en NS3 a las 11:00, 13:00 y 17:30.	248
Figura 5. 28. Puntos del pavimento estudiados en la escena NS3.	249
Figura 5. 29. Evolución de la Temperatura superficial aparente de puntos seleccionados del pavimento de la escena NS3 (arriba). Diferencia de temperatura entre los puntos al sol y la sombra (abajo).....	250
Figura 5. 30. Irradiancia directa simulada en HELIODON 2 para el 8 Julio bajo condiciones de cielo despejado (W/m ²) para superficies verticales y horizontales sin obstrucciones.	251
Figura 5. 31. Radiación solar con y sin toldo sobre las fachadas Este y Oeste de la zona EO123 el día 08 de Julio (kWh/m ² día). Simulación en HELIODON 2, considerando sólo la componente directa, cielo despejado y un toldo de obstrucción del 100%.	252
Figura 5. 32. Radiación solar con y sin toldo sobre las fachadas Norte y Sur de la zona NS34 el día 08 de Julio (kWh/m ² día). Simulación en HELIODON 2, considerando sólo la componente directa, un cielo despejado y toldo de obstrucción del 100%.	253
Figura 5. 33. Edificio de estudio en la calle Jesús y María (Fuente: Propia a partir de Google Earth Pro).	254
Figura 5. 34. Fotografía y termografía de la fachada Oeste y del toldo de la escena urbana EO2 a las 15:00h, indicando el edificio y los puntos de análisis.	255
Figura 5. 35. Evolución de las temperaturas superficiales de puntos al sol y la sombra del toldo en la fachada Oeste de la escena urbana EO2.	256
Figura 5. 36. Evolución del promedio de temperaturas superficiales de las áreas de toldo de las escenas EO5, NS1 y NS3 y de la fracción de cielo visible en la escena urbana EO4.	257
Figura 5. 37. Radiación IR emitida por los toldos de EO5 y NS1 y el cielo sobre plano horizontal.	258
Figura 5. 38. Fotografías y termografías del cielo y del toldo visible en las escenas EO4, NS1 y NS3 a las 12:00.	259
Figura 5. 39. Flujo solar incidente sobre el pavimento (arriba) y de temperaturas superficiales alcanzadas al sol y a la sombra del toldos con distinta obstrucción solar.....	260
Figura 5. 40. Diagramas de los factores de vista entre un peatón situado en la posición A y su entorno urbano, en seis direcciones.....	263
Figura 5. 41. Resultado ponderado de los factores de vista del peatón situado en la posición A y su entorno urbano.	264
Figura 5. 42. SVF sobre la fachada Oeste de la Calle Cruz Conde, con y sin toldo.	265
Tabla 5. 1. Variables de estudio seleccionadas para el análisis paramétrico de la efectividad del toldo.	223
Tabla 5. 2. Resumen de características de los toldos en NS1 y NS3 extraídas de mediciones sobre muestras (M) o in-situ (R).	257