



Received: 29-09-2015
Accepted: 14-12-2015

Anales de Edificación
Vol. 2, Nº1, 49-58 (2016)
ISSN: 2444-1309
Doi: 10.20868/ade.2016.3198

Hacia un modelo dinámico para la isla de calor urbana de Madrid Towards a Dynamic Model for the Urban Heat Island of Madrid

Miguel Núñez Peiró^a & Emilia Román López^a & Carmen Sánchez-Guevara Sánchez^a & Francisco Javier Neila González^a

^aUniversidad Politécnica de Madrid (Spain)

Resumen—Esta investigación se enmarca dentro del proyecto MODIFICA (modelo predictivo - Edificios - Isla de Calor Urbano), financiado por el Programa de I + D + i Orientada a los Retos de la sociedad 'Retos Investigación' de 2013. Está dirigido a desarrollar un modelo predictivo de eficiencia energética para viviendas, bajo el efecto de isla de calor urbano (AUS) con el fin de ponerla en práctica en la evaluación de la demanda de energía real y el consumo en las viviendas. A pesar de los grandes avances que se han logrado durante los últimos años en el rendimiento energético de edificios, los archivos de tiempo utilizados en la construcción de simulaciones de energía se derivan generalmente de estaciones meteorológicas situadas en las afueras de la ciudad. Por lo tanto, el efecto de la Isla de Calor Urbano (ICU) no se considera en estos cálculos, lo que implica una importante falta de precisión. Centrado en explorar cómo incluir los fenómenos ICU, el presente trabajo recopila y analiza la dinámica por hora de la temperatura en diferentes lugares dentro de la ciudad de Madrid.

Palabras clave— Madrid; Isla de calor urbana; Simulación de energía; Estaciones meteorológicas; Comodidad.

Abstract- This research is framed within the project MODIFICA (Predictive model - Buildings - Urban Heat Island), funded by Programa de I+D+i orientada a los retos de la sociedad 'Retos Investigación' 2013. It is aimed at developing a predictive model for dwelling energy performance under the Urban Heat Island (UHI) effect in order to implement it in the evaluation of real energy demand and consumption in dwellings. Despite great advances on building energy performance have been achieved during the last years, weather files used in building energy simulations are usually derived from weather stations placed in the outskirts of the city. Hence, Urban Heat Island (UHI) effect is not considered in this calculations, which implies an important lack of accuracy. Focused on exploring how to include the UHI phenomena, the present paper compiles and analyses the hourly dynamics of temperature in different locations within the city of Madrid.

Index Terms— Madrid; Urban Heat Island; Energy Simulation; Weather Stations; Comfort.

M. Núñez, Architect from Universidad de Sevilla, is now a master student at Universidad Politécnica de Madrid and collaborator researcher at ABIO Group from Departamento de Construcción y Tecnologías Arquitectónicas (e-mail: miguel.nunez.peiro@alumnos.upm.es).

E. Román, PhD Architect and cofounder of CC60, is associate teacher at Universidad Politécnica de Madrid and researcher at GIAU+S from Departamento de Urbanística y Ordenación del Territorio (e-mail: emilia.roman@upm.es).

C. Sánchez-Guevara is Architect and PhD student at Universidad Politécnica de Madrid. Coordinator of MODIFICA project, she works as researcher at ABIO Group from Departamento de Construcción y Tecnologías Arquitectónicas and as a teacher at Universidad Politécnica de Madrid (e-mail: carmen.sanchezguevara@upm.es).

F.J. Neila is PhD Architect and Professor at Universidad Politécnica de Madrid. Researcher and Head of ABIO Group from Departamento de Construcción y Tecnologías Arquitectónicas (e-mail: fjavier.neila@upm.es).

I. INTRODUCCIÓN

Según el último informe de la ONU, más de la mitad de la población reside en entornos urbanos. Las previsiones apuntan a que, en 2050, dos de cada tres personas residirán en la ciudad y, en el caso de Europa, actualmente ya lo hacen tres de cada cuatro (Naciones Unidas, 2014). La población urbana, por lo tanto, muestra una tendencia creciente y ya representa ampliamente a la mayoría de la población mundial.

Este fenómeno, el movimiento migratorio campo-ciudad, si bien se ha acentuado en las últimas décadas, lleva ocurriendo desde la Revolución Industrial, a partir de finales del s. XVIII. Tales fueron las consecuencias sobre la vida en las ciudades, que pronto empezaron a aparecer estudios en relación al clima urbano. La primera obra dedicada al estudio de este fenómeno aparece a comienzos del s. XIX (Howard, 1833), aunque no es hasta el s. XX cuando se generaliza. Cabe destacar que, junto a la contaminación, la temperatura ha sido el parámetro del clima urbano más ampliamente estudiado (Geiger, 1950; Kratzer, 1956; Chandler, 1965).

El término que hace referencia a la variación de temperaturas producido por la aglomeración urbana con respecto al campo es la Isla de Calor Urbana, también denominada ICU, y fue acuñado por primera vez por Gordon Manley (Manley, 1958). El estudio de la ICU se intensificó durante la década de los setenta y ochenta, momento en el cual se dibujaron mapas de clima urbano en múltiples ciudades europeas, norteamericanas y asiáticas (Santamouris, 2015; Santamouris, 2007). Por lo general, representaban isotermas sobre planos de ciudades en diferentes momentos del año. En Madrid, los primeros se desarrollaron a finales de los años ochenta (López Gómez et al, 1988), ampliándose a comienzos de los noventa mediante termografías aéreas (López Gómez et al, 1993) y estudios tematizados sobre la influencia de la orografía (Fernández García et al., 1996), las situaciones sinópticas (Almendros et al, 1995), etc. De estos primeros años dedicados al estudio del clima urbano de Madrid existe una extensa producción bibliográfica (Bejarano Mederos, 2002).

Ya en el s. XXI, más allá de seguir caracterizando la ICU de diferentes núcleos urbanos, su estudio se ha centrado principalmente en el desarrollo de modelos numéricos y analíticos que posibilitan el estudio pormenorizado de la ICU, lo que permite, además, caracterizar este fenómeno sin necesidad de realizar mediciones locales. Sin embargo, debido a la complejidad y a la gran cantidad de factores que influyen en el clima urbano, los resultados no alcanzan la precisión deseados. Esta circunstancia determina que los mapas clásicos sobre el clima urbano todavía sirvan de referencia en estudios e investigaciones.

Respecto a la integración de este fenómeno en la evaluación energética edificatoria (otro de los grandes campos desarrollados durante este s. XXI y tema central tanto de este

trabajo como de la investigación en la que se encuadra), el principal problema radica en que los mapas de clima urbano constituyen una imagen fija, una representación geográfica del fenómeno en un momento determinado. En otras palabras, son estáticos. Frente a esto, los programas de simulación energética se fundamentan en complejos cálculos que analizan el régimen dinámico del comportamiento del clima, los usuarios y la interacción de ambos con el edificio.

Es en este punto donde incide el presente trabajo: el estudio de cómo un fenómeno que ha sido fundamentalmente abordado desde la observación estática puede ser dotado de una caracterización dinámica acorde a la simulación energética.

II. HIPÓTESIS Y OBJETIVOS

Desde hace años la evaluación energética edificatoria se desarrolla mediante programas de simulación energética, los cuales se nutren de información sobre el edificio, los perfiles de uso y el clima. Los *archivos climáticos* sirven de base a ésta última, incluyendo información sobre el clima en el que se localiza la edificación. Por tanto, las especificidades climáticas del fenómeno estudiado podrían incluirse a través de estos archivos. De este razonamiento parte la hipótesis de este proyecto, y es que *es posible caracterizar el efecto de la isla de calor urbana a través del archivo climático empleado en la simulación energética*.

El alcance de este trabajo, como parte inicial del proyecto de investigación, consiste en averiguar cómo debe llevarse a cabo esta modificación. Para ello se han fijado dos objetivos:

1. Verificar la hipótesis inicial, es decir, la capacidad de trasladar el efecto de la ICU a la evaluación energética edificatoria a través del archivo climático.
2. Identificar las características principales de la ICU y cómo éstas deberían llevarse a la simulación energética.

III. MEDIOS Y MÉTODOS

Se ha trabajado con dos fuentes de datos, empleándose una como valor de referencia, y la otra como representación del efecto de la ICU. A través de las diferencias manifestadas entre ambas fuentes, tanto a nivel anual, mensual y diario, se obtienen las conclusiones de este trabajo.

Como valores de referencia se toma un archivo climático de simulación, seleccionando el más adecuado en base en su caracterización horaria.

Como representación del efecto de la ICU se han tomado los registros urbanos procedentes del Sistema Integral de la Calidad del Aire de Madrid (SICAM). Mediante la representación de climogramas de Givoni se ha realizado una primera caracterización, a la que se ha adjuntado la obtenida de los estudios existentes sobre la ICU, lo que ha permitido

seleccionar las ubicaciones más representativas para este estudio.

IV. SELECCIÓN DE DATOS

A. Los archivos climáticos de simulación

Los archivos climáticos proporcionan información sobre el clima a los programas de simulación energética. Entre todos los parámetros incluye la temperatura de bulbo seco y, al igual que con el resto de valores, posee una caracterización horaria. Este hecho es de gran relevancia, ya que establece la resolución máxima a la que se puede llegar a trasladar el fenómeno de la isla de calor: el nivel horario.

TABLE I
PARÁMETROS REGISTRADOS POR LOS ARCHIVOS CLIMÁTICOS Y POR LAS ESTACIONES DEL SISTEMA INTEGRAL DE LA CALIDAD DEL AIRE. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

	Dry Bulb Temperature (°C)	Relative Humidity (%)	Dew Point Temperature (°C)	Ground Temperature (°C)	Rainfall (mm ²)	Atmospheric Pressure (atm.)	Wind Direction (degrees)	Wind Speed (m/s)	Solar Radiation (Wh/m ²)	Illumination (lux)
IWEC	X	X	X	X			X	X	X	X
SWEC	X	X	X	X					X	
Casa de Campo	X	X			X	X	X	X	X	
Cuatro Caminos	X				X					
E. de Vallecas	X				X		X	X	X	
Farolillo	X				X					
Juan Carlos I	X	X			X	X	X	X	X	
Pza. de Castilla	X									
Pza. de España	X	X			X		X	X		
Plaza Fdez. Ladreda	X	X			X		X	X		
Sanchinarro	X									

Actualmente no existe ninguna normativa que especifique cómo deben elaborarse estos archivos climáticos por lo que, dependiendo del organismo que los desarrolle, esta información puede provenir de diferentes fuentes, periodos de tiempo, e incluso contar con diferentes tratamientos estadísticos.

En el caso de la ciudad de Madrid existen dos archivos climáticos de referencia, el Spanish Weather for Energy Calculations (SWEC) y el International Weather for Energy Calculations (IWEC) (U.S. Department of Energy, 2015)

Los archivos SWEC son la referencia oficial en territorio español, y están basados en medias mensuales procedentes de la Agencia Española de Meteorología. Su caracterización horaria se realiza mediante interpolación.

Los archivos IWEC, son desarrollados por ASHRAE y se fundamentan en mediciones horarias del DATSAV3 (base de datos estadounidense procedente de diversos observatorios terrestres).

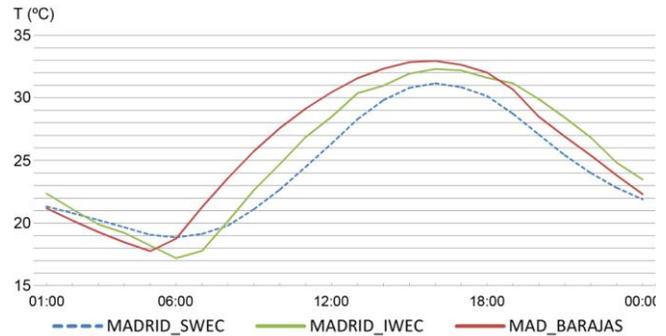


Fig. 1. Registros horarios medios en el mes de julio según SWEC e IWEC. Registros medios del observatorio de Barajas (AEMET) del periodo 2010-2014. Fuente: elaboración propia.

Las diferencias entre los dos archivos son notables, tal y como se observa en la Figura 1. Por un lado el trazado de SWEC muestra una trayectoria teórica, mientras que el trazado de IWEC se aproxima más a los datos proporcionados por la estación meteorológica de Barajas, presentando un desfase con respecto a éste.

El archivo SWEC se ha establecido como referencia dentro de este trabajo, pese a que muestra mayores diferencias respecto a los datos aportados por Barajas. Los motivos que han llevado a esta decisión son que, en primer lugar, se encuentra dentro del marco normativo español, siendo éste archivo empleado en los procesos de calificación energética (Gobierno de España, 2013). En segundo lugar, porque su trazado teórico lo aleja de posibles alteraciones debido a la situación de las estaciones climáticas, como muestra el desfase del archivo IWEC con respecto a Barajas.

B. Las estaciones de calidad del aire

Cuando se analiza el efecto de isla de calor urbana en la ciudad deben de tenerse en cuenta los dos niveles principales en los que se divide. La "capa de cubierta urbana" (urban canopy layer) define el límite del nivel inferior, contenido bajo la cornisa de los edificios, en el denominado cañón urbano (Nunez & Oke, 1977). En éste se reflejan claramente los efectos producidos por la aglomeración urbana, la vegetación y la actividad humana, y donde la poca presencia de viento permite la generación de microclimas urbanos que dan lugar a diferentes variaciones de temperatura. El nivel superior, delimitado entre la "capa de cubierta urbana" y la "capa límite" (boundary layer) (Oke, 1976), actúa a una escala territorial, y aunque a su vez afecta al nivel inferior impidiendo la disipación de calor, su estudio no puede proporcionar el detalle de la escala urbana. Las estaciones empleadas en este estudio deben, por tanto, situarse próximas

al nivel del suelo.

El Sistema Integral de la Calidad del Aire de Madrid (SICAM) se encarga de registrar la evolución de la contaminación en distintos puntos de la ciudad de Madrid, y todas sus estaciones se encuentran ubicadas a pocos metros por encima del nivel del suelo. Se da la circunstancia de que algunas de ellas registran igualmente parámetros climáticos, y todos sus registros se realizan de forma horaria. Por todo esto resultan del todo convenientes para este estudio.

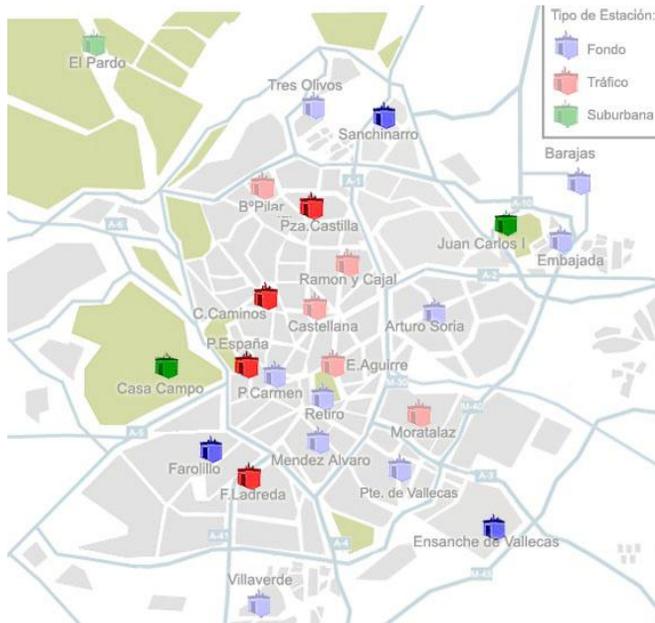


Fig. 2. Distribución de las 33 estaciones del Sistema Integral de la Calidad del Aire de Madrid. Resaltadas aquellas que cuentan con registros horarios de temperatura. Fuente: Sistema Integral de la Calidad del Aire de Madrid

La vigilancia de la calidad del aire lleva realizándose en la ciudad de Madrid desde hace décadas, al igual que en el resto de ciudades europeas, en virtud de la directiva del Consejo Europeo 96/62/CE, y donde se adopta un planteamiento general sobre la evaluación de la calidad del aire (Comisión Europea, 1996). Ésta ha sido modificada en numerosas ocasiones, y finalmente ha sido sustituida por una nueva, extendiéndose la vigilancia a nuevos contaminantes y ampliando los requisitos para realizar estas mediciones (Comisión Europea, 2008).

Esta última directiva ha sido recientemente trasladada al marco normativo español (Gobierno de España, 2011), si bien su aplicación comenzó un año antes en ciudades como Madrid. En ella se establecen los criterios para la correcta ubicación y registro de las estaciones, provocando el traslado de varias de éstas.

Para este estudio se incluyen series completas anuales en el periodo de tiempo 2010-2014, ambos inclusive, dado que anteriormente la ubicación de las estaciones era diferente. Si bien no constituye una serie histórica, ha sido considerada suficiente para reflejar las particularidades del clima urbano

madrialeño.

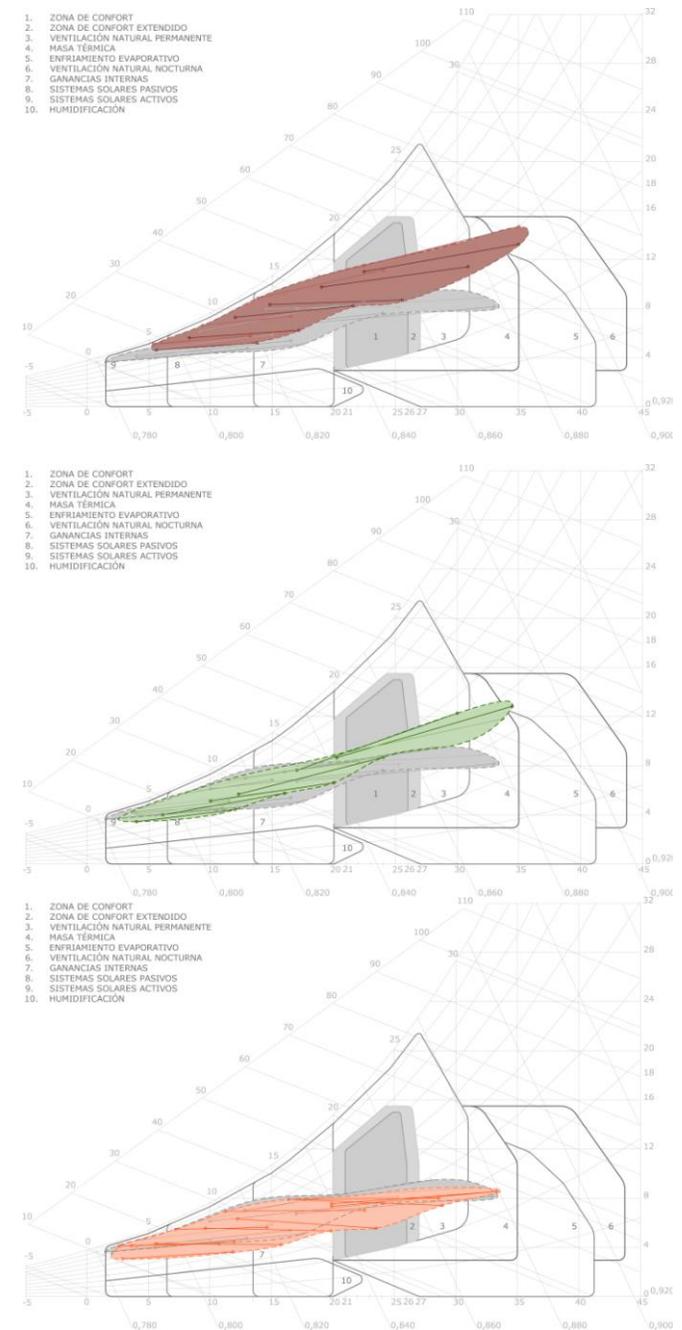


Fig. 3. Diagramas de Givoni. En gris, los datos del archivo climático. Arriba, en rojo, los datos recogidos por Fernández Ladreda; en medio, los datos recabados por Juan Carlos I; abajo, los datos de Plaza de España (2010-2014). Fuente: elaboración propia.

En total se cuenta con 9 estaciones que realizan mediciones de temperatura horarias, del total de 33 estaciones de medición del SICAM. En la Figura 2 se puede observar su distribución en el tejido urbano, apreciándose en ella una distribución heterogénea de las estaciones que registran datos climáticos. En este trabajo esto no resulta relevante, ya que el objetivo no es realizar un análisis del efecto de isla de calor urbana en Madrid, sino valorar cómo son las dinámicas térmicas

microclimáticas bajo diferentes circunstancias.

Con el objetivo de poder realizar una selección de las estaciones más relevantes para este estudio se ha empleado el climograma de Givoni. Éste se basa en la representación de las temperaturas y humedades relativas medias mensuales de un lugar específico sobre un ábaco psicrométrico, en el que se incluyen además zonas de confort higrotérmico (Givoni, 1969).

Se ha desarrollado un climograma de Givoni para cada estación, incluyéndose en éste los datos procedentes del archivo climático. En la *Figura 3* se muestran a modo de ejemplo tres estaciones de calidad del aire. Se observan diferencias notables tanto entre las propias estaciones como respecto al archivo climático en sí, lo que confirma el efecto de la isla de calor urbana.

Además de atender a las diferencias de temperatura entre las estaciones, se ha recurrido a los estudios previos realizados sobre la isla de calor urbana de Madrid para poder realizar una selección de éstas. Finalmente se ha optado por trabajar con cuatro, dos céntricas y dos periféricas:

- A) *Cuatro Caminos*, céntrica
- B) *Plaza de España*, céntrica
- C) *Casa de Campo*, periférica
- D) *Ensanche de Vallecas*, periférica

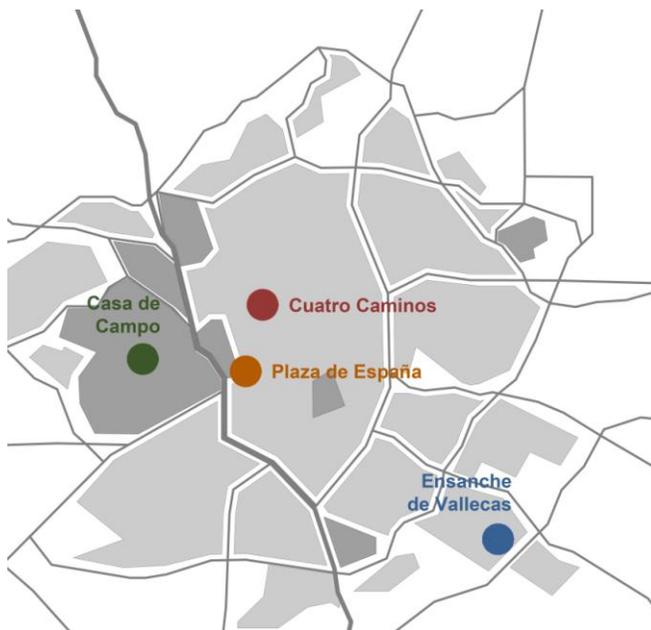


Fig. 4. Ubicación de las cuatro estaciones seleccionadas. Fuente: elaboración propia

Las tres primeras estaciones (A, B, C) se han elegido por encontrarse muy próximas entre sí y representar entornos urbanos muy diferentes. Además, éstas se encuentran en el entorno de la vaguada del Manzanares, lugar donde acontece uno de los fenómenos más característicos de la ICU de Madrid (Fernández García et al., 1996), la canalización del aire frío procedente del entorno rural hacia el interior de la ciudad.

De este modo, *Cuatro Caminos* y *Casa de Campo*, si bien

se sitúan en entornos radicalmente opuestos, se sitúan equidistantes a la vaguada. *Plaza de España*, a pesar de ser urbana, su microclima se ve afectado por la conexión con la vaguada y por la importante presencia de vegetación.

La estación de *Ensanche de Vallecas* se ha elegido por su situación y las características morfológicas urbanas. El objetivo es analizar las variaciones producidas en las temperaturas en un entorno periférico que, debido a que sigue en construcción, cuenta con una baja densidad urbana.

V. RESULTADOS

Partiendo de la selección tanto de las estaciones urbanas como del archivo climático de referencia, se procede en este apartado a realizar un análisis de la evolución anual, mensual, y diaria en régimen horario de las temperaturas en cada uno de los puntos de observación.

A. Evolución anual de las temperaturas.

Para analizar la evolución anual de las temperaturas en las diferentes estaciones urbanas se ha optado por mostrar su desarrollo temporal a lo largo de doce gráficos, correspondientes a los meses del año. Todos ellos quedan recogidos en la *Figura 5*. En estos se muestra la variación de temperatura producida entre éstas y el archivo climático, establecido como el valor de referencia.

Se observa como dato tendencial que el incremento de temperaturas es principalmente positivo, es decir, las temperaturas de las estaciones urbanas son superiores a las del archivo climático a lo largo de prácticamente todos los días del año.

Este aumento de temperaturas es, además, significativamente más acentuado en los meses cálidos que en los meses fríos, acompañando el régimen estacional de nuestro año climático. Desde el punto de vista energético y del confort, se trata de un efecto claramente desfavorable, ya que intensifica el calor en verano y apenas contrarresta el frío del invierno. En otras palabras, no tener en cuenta este efecto en la simulación energética no solo aleja las estimaciones del comportamiento real de la edificación, sino que además subestima la severidad del clima en el que se encuadra, algo inadecuado no solo en la evaluación sino también en la calificación energética.

Las diferencias de temperatura también ocurren a lo largo de la jornada, siendo más elevadas en la noche que durante el día, y éstas varían a su vez durante los meses, tal y como se ha indicado en los párrafos anteriores. Por tanto, la modificación de la temperatura debería realizarse hora a hora, y no a través de una constante diaria u horaria.

Por último, atendiendo al comportamiento particular de cada una de las estaciones, se observa que el incremento de temperatura más elevado lo registra la estación de *Cuatro*

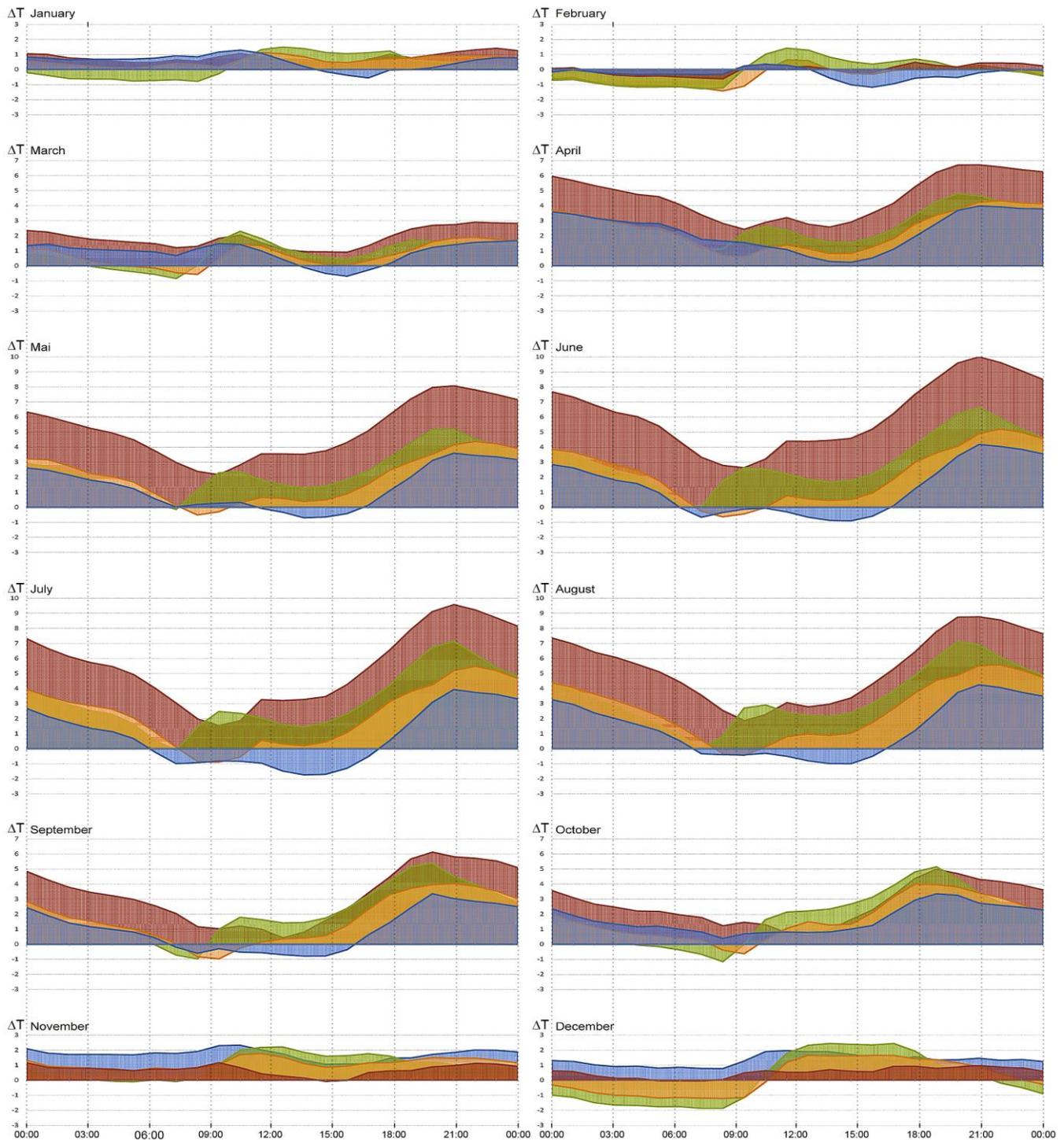


Fig. 5. Variación de las temperaturas a lo largo de un año tipo (2010-2014), con respecto a los datos del archivo climático base. En rojo, *Cuatro Caminos*; en naranja, *Plaza de España*; en verde, *Casa de Campo*; en azul, *Ensanche de Vallecas*. Fuente: elaboración propia.

Caminos, mientras que el más bajo se encuentra en *Ensanche de Vallecas*. *Casa de Campo*, debido a su entorno alejado de la edificación, muestra un incremento acusado de temperaturas a primeras horas de la mañana, a diferencia del resto de estaciones. *Plaza de España*, por su parte, cuenta con un desarrollo muy similar a la estación de *Cuatro Caminos*, pero mucho más suavizado, probablemente debido a la presencia de la vaguada y de la vegetación.

De estas últimas observaciones se deduce que existe una importante variación de temperaturas entre estaciones urbanas próximas. Son tantas las variables, y tan variada su influencia, que resulta complicado establecer patrones dentro de la ciudad.

Por ello, para poder conocer verdaderamente las particularidades climáticas de la ciudad de Madrid, habría que llevar a cabo una zonificación que respondiera a la morfología urbana, a su ubicación geográfica y a la presencia de

elementos singulares como, por ejemplo, las vaguadas. Conviene señalar que este procedimiento ha sido recientemente llevado a cabo en la ciudad de Londres (Kolokotroni et al, 2010), mostrando resultados muy prometedores, y por lo que puede ser empleado como marco en futuros proyectos.

B. Evolución mensual de las temperaturas.

En este caso se recogen los valores referentes al mes más cálido, julio, el mes más frío, enero, y un mes intermedio que se ha fijado en abril, tal y como recoge la *Figura 6*. Se aprecia

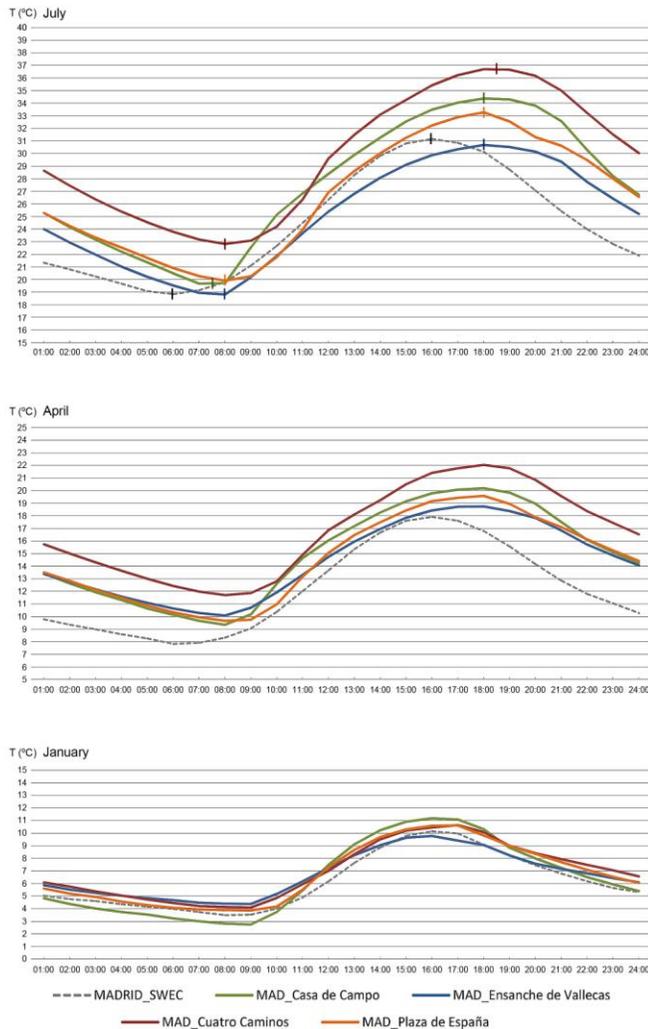


Fig. 6. Representación de las temperaturas medias horarias registradas en diferentes meses (2010-2014). Arriba el mes de julio, en el centro el mes de abril, y abajo el mes de enero. Fuente: elaboración propia.

un importante desfase de la onda térmica en el conjunto de las estaciones urbanas: desde ser prácticamente inexistente en los meses fríos, hasta llegar a suponer dos horas de retardo en el mes más cálido.

Se puede observar cómo, a pesar de la heterogeneidad de las estaciones urbanas escogidas, el desfase de la onda térmica se

mantiene cada mes constante en todas ellas, por lo que éste podría considerarse como una característica intrínseca a todas ellas, como una tendencia común.

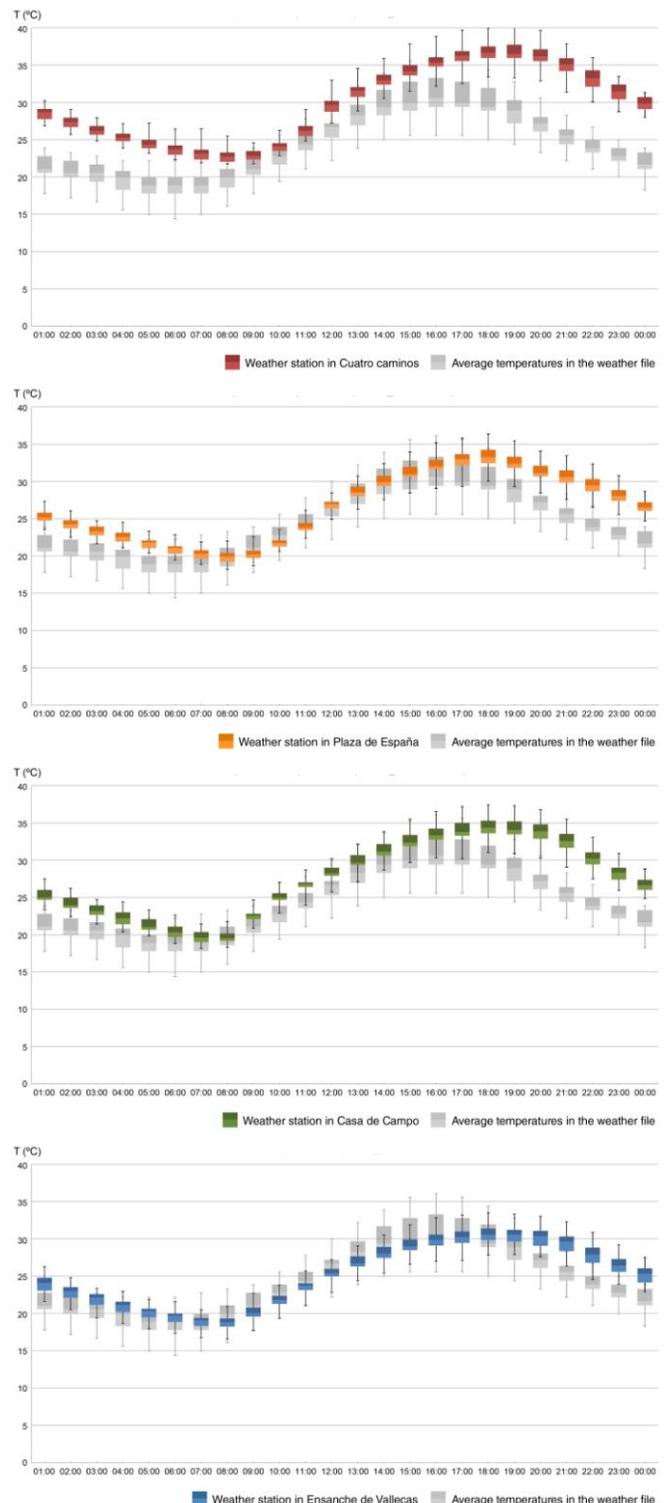


Fig. 7. Representación por cuartiles de las temperaturas horarias registradas en diferentes estaciones, durante el periodo de tiempo 2010-2014, ambos inclusive. Fuente: elaboración propia.

Cabe aquí señalar la relevancia del desfase de la onda

térmica en la simulación energética, ya que si bien no afecta a los picos de temperatura, sí que puede alterar el efecto de la inercia térmica de los edificios.

El empleo de la inercia térmica es un recurso muy frecuente en la arquitectura bioclimática, y su objetivo es amortiguar y desfazar la onda térmica en el interior del edificio mediante el uso de masa térmica. Dado que se dimensiona en función del clima en el que se ubica el edificio, resulta importante incluir este efecto en la modificación del archivo climático, no solo por el grado de precisión de los datos de partida, sino porque esta simbiosis, producida tanto por la inercia de la ciudad como del propio edificio, puede aumentar de forma exponencial la demanda final de energía, además de afectar al propio confort de los usuarios.

Por otro lado, en un sentido más favorable, los edificios cuyo uso se concentra en la primera mitad de las horas diurnas pueden llegar a beneficiarse de este desplazamiento de la onda térmica, en algunos casos situándose en la denominada *isla de frescor* (Debbage & Shepherd, 2015). Resulta por tanto interesante, desde el punto de vista de la evaluación energética, poder simular las condiciones en las que ésta se produce.

Además del marcado desfase de onda térmica, también se aprecian diferencias en la distribución de las temperaturas máximas y mínimas, acentuándose en el mes más cálido. Mientras que las temperaturas máximas se distribuyen por encima de las del archivo climático, las mínimas registradas por tres de estas cuatro estaciones tienden a igualarse con la mínima de referencia.

Este efecto resulta extraño, ya que contradice muchos estudios previos realizados sobre la dinámica horaria de la isla de calor (Yagüe et al, 1991; Fernández García et al, 2008), en los que se apunta a que las mínimas urbanas se mantienen muy por encima de las mínimas registradas en las zonas rurales. Si bien cabe señalar que nuestra referencia no es el mundo rural, sino el archivo climático, sí que conviene analizar y explicar el motivo de este efecto.

El razonamiento que se le da a este inusual fenómeno parte de la especial ubicación de estas estaciones, que se detalla a continuación.

La estación de *Ensanche de Vallecas* se sitúa en una zona suburbana, y no es de extrañar que su temperatura mínima se corresponda con la del archivo climático, ya que su máxima también lo hace.

Por otro lado, *Casa de Campo* se encuentra en una zona más próxima al centro urbano, pero en un entorno con escasa edificación. El punto de observación se encuentra, además, en una zona con muy poca vegetación, en un cruce de caminos de tierra compactada. Se trata por tanto de una zona muy expuesta que, al no contar con la presencia de abundante vegetación, ni agua, ni edificación, sufre grandes oscilaciones de temperatura, llegando durante el día a máximas

relativamente altas y a mínimas muy acentuadas.

El último lugar se encuentra *Plaza de España*, donde a pesar de su céntrica ubicación en la ciudad, su comportamiento se encuentra influenciado tanto por la presencia de vegetación como, de una manera más importante, la vaguada del Manzanares. Ésta canaliza durante la noche el aire procedente de las zonas rurales debido al sobrecalentamiento del núcleo urbano, en un fenómeno conocido como *movimiento advectivo de aire* (Fernández García, 2002)

C. Evolución diaria de las temperaturas.

Los valores de temperatura representados en la Figura 5 muestran las medias horarias durante tres meses seleccionados, comparándolas con el archivo de referencia. Se ha podido comprobar que la ICU se acentúa más en el mes de julio, tanto en temperaturas máximas como en el desfase de onda. En este apartado se pretende analizar con mayor detalle la dinámica diaria de las temperaturas en este mes en concreto, y para ello se realiza un análisis de la dispersión de datos durante el periodo de tiempo recogido en este estudio (2010-2014)

En la figura 7 se muestra una distribución por cuartiles de los valores obtenidos para cada una de las estaciones urbanas en el mes de julio. Para poder compararlas mejor entre sí, se han acompañado de los cuartiles del archivo climático.

De forma generalizada se observa que el 2º y 3º cuartil muestran muy poca dispersión con respecto a la mediana, indicativo de una gran estabilidad diaria en los resultados. Por otro lado, la dispersión que se observa en el 1º y 4º cuartil probablemente se corresponda con los días en los que las situaciones sinópticas varían con respecto a la normalidad, el tiempo estable característico la época estival madrileña (Fernández García & Galán, 1995).

Como es sabido, la nubosidad, la lluvia y el viento, por separado o combinadas, reducen la temperatura impidiendo que la radiación incida sobre la superficie, refrigerando por evaporación, o disipando y sustituyendo el aire caliente por uno más frío. Llama la atención que en las ubicaciones más calientes (*Cuatro Caminos*), ni en los casos en los que se combinan estas tres situaciones se logre reducir la temperatura hasta los valores medios del archivo climático. En el caso de las cuatro estaciones, en ningún caso desaparece el desfase de la onda térmica.

Puede concluirse, por tanto, que si bien la dinámica de la ICU varía a lo largo del año, su comportamiento diario permanece, al menos parcialmente, a pesar de las variaciones sinópticas diarias.

Por otro lado, y de una manera más sutil, se aprecia que la dispersión de datos es más acentuada en las estaciones más cálidas. La dispersión del cuartil superior (4º cuartil) recoge

los fenómenos que acentúan la subida de temperaturas, dando como resultado episodios de temperaturas extremas o, en algunos casos, olas de calor (Fernández, 2008). El hecho de que la dispersión de datos sea superior cuando las temperaturas son más extremas parece indicar que, a mayor intensidad de isla de calor, mayor incremento de temperaturas, siendo por tanto especialmente relevante al trabajar en zonas donde sean frecuentes los episodios de calor extremos, y siendo por tanto una dinámica más a incluir al trasladar el efecto de la ICU a la evaluación energética edificatoria.

VI. CONCLUSIONES

Tal y como se establecía al principio del trabajo, el clima urbano y el efecto de la isla de calor urbana han sido ampliamente estudiados durante las últimas décadas. Sin embargo, para poder trasladar este fenómeno a la evaluación energética, debe llevarse a cabo una caracterización dinámica de este fenómeno.

Tras evaluar el comportamiento de las temperaturas en diferentes puntos de la ciudad, se concluye que la ICU de Madrid es un fenómeno que presenta variaciones estacionales y diarias, por lo que su traslado a la simulación energética debe llevarse a cabo mediante una modificación del archivo climático hora a hora.

Por lo tanto, no sólo se confirma la hipótesis de partida, siendo posible la integración de los efectos de la ICU en la simulación a través de la modificación del archivo climático, sino que resulta además necesario a fin de no subestimar la severidad climática del entorno en el que se ubica la edificación.

Cabe señalar que, al tratarse de un efecto geográfico y dependiente tanto de la morfología urbana como de la presencia de elementos singulares (vaguadas o grandes masas arbóreas o de agua, por ejemplo), su caracterización debe llevarse a cabo mediante una zonificación del área urbana que responda a estos tres criterios.

Por último, las observaciones horarias y de dispersión de datos que se han realizado apuntan a que, tanto las oscilaciones térmicas como el desfase de la onda térmica, no están enteramente condicionados por las situaciones sinópticas diarias, sino que pertenecen a un régimen temporal mayor.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se ha desarrollado dentro del marco del Programa de I+D+i orientado a los retos de la sociedad 'Retos Investigación' 2013, financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad. Código de proyecto BIA2013-41732-R

Del mismo modo, se agradece la ayuda prestada por la Unidad de Información Meteorológica de la AEMET, así

como la información ofrecida por el Sistema Integral de Calidad del Aire de Madrid, enmarcado dentro del Área de Gobierno de Medio Ambiente y Movilidad, ambas muy valiosas para el desarrollo de este estudio.

REFERENCIAS

- Almendros, M. Á., & López Gómez, A. (1995). La isla de calor en Madrid y las situaciones sinópticas. *Estudios Geográficos*, 56(219), 207–221.
- Bejarano Mederos, M. del C. (2002). Los estudios de la isla de calor en Madrid. *Estudios Geográficos*, 63(248-249), 775–788.
- Chandler, T. J. (1965). *The climate of London*. London: Hutchinson of London.
- Comisión Europea. (1996). Directiva 96/62/CE, de 27 de septiembre de 1996, sobre evaluación y gestión de la calidad del aire ambiente.
- Comisión Europea. (2008). Directiva 2008/50/CE, de 21 de mayo de 2008, relativa a la calidad del aire ambiente y a una atmósfera más limpia en Europa.
- Debbage, N., & Shepherd, J. M. (2015). Computers , Environment and Urban Systems The urban heat island effect and city contiguity. *Computers, Environment and Urban Systems*, 54, 181–194. doi:10.1016/j.compenvurbsys.2015.08.002
- Fernández García, F. (2002). El clima urbano de Madrid y su influencia sobre el confort térmico. *Boletín de La Real Sociedad Geográfica*, 137-138, 12.
- Fernández García, F., Almendros Coca, M. Á., & López Gómez, A. (1996). La influencia del relieve en la isla de calor de Madrid: las vaguadas del Manzanares y del Abroñigal. *Estudios Geográficos*, 57(224), 473–494.
- Fernández García, F., & Galán, E. (1995). Clima y contaminación atmosférica en Madrid. *Estudios Geográficos*, 56(219), 263–284.
- Fernández García, F., & Rasilla Álvarez, D. (2008). Olas de calor e influencia urbana en Madrid y su área metropolitana. *Estudios Geográficos*, LXIX(265), 495–518. doi:10.3989/estgeogr.0440
- Geiger, R. (1950). *The climate near the ground*. Cambridge: Blue Hill Meteorological Observatory, Harvard University.
- Givoni, B. (1969). *Man, climate and architecture*. Amsterdam: Elsevier.
- Gobierno de España. (2011). R.D. 102/2011, de 28 de enero, relativo a la mejora de la calidad del aire.

- Gobierno de España. (2013). R.D. 235/2013, de 5 de abril, por el que se aprueba el procedimiento básico para la certificación de la eficiencia energética de los edificios.
- Howard, L. (1833). *The Climate of London* vol. I. London: Harvey and Darton.
- Kolokotroni, M., Davies, M., Croxford, B., Bhuiyan, S., & Mavrogianni, A. (2010). A validated methodology for the prediction of heating and cooling energy demand for buildings within the Urban Heat Island: Case-study of London. *Solar Energy*, 84(12), 2246–2255. doi:10.1016/j.solener.2010.08.002
- Kratzer, A. (1956). *Das Stadtklima*. Friedr. Vieweg and Sohn Braunschweig.
- López Gómez, A., López Gómez, J., Fernández García, F., & Arroyo Ilera, F. (1988). *El Clima urbano de Madrid: La isla de calor*. Madrid: CSIC.
- López Gómez, A., López Gómez, J., Fernández García, F., & Moreno Jiménez, A. (1993). *El Clima urbano: teledetección de la isla de calor en Madrid*. Madrid: MOPT. Retrieved from <http://books.google.com/books?hl=es&lr=&id=JEWPsCRjv7YC&pgis=1>
- Manley, G. (1958). On the frequency of snowfall in metropolitan England. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological ...*, 42(42), 70–72. doi:10.1002/qj.49708435910
- Naciones Unidas. (2014). *La situación demográfica en el mundo*.
- Nunez, M., & Oke, T. R. (1977). The Energy Balance of an Urban Canyon. *Journal of Applied Meteorology*. doi:10.1175/1520-0450(1977)016<0011:TEBOAU>2.0.CO;2
- Oke, T. R. (1976). The distinction between canopy and boundary layer urban heat islands. *Atmosphere*, 14(September), 268–277. doi:10.1080/00046973.1976.9648422
- Santamouris, M. (2007). Heat Island Research in Europe: The State of the Art. *Advances in Building Energy Research*, 1(1), 123–150. doi:10.1080/17512549.2007.9687272
- Santamouris, M. (2015). Analyzing the heat island magnitude and characteristics in one hundred Asian and Australian cities and regions. *Science of The Total Environment*, 512-513, 582–598. doi:10.1016/j.scitotenv.2015.01.060
- U.S. Department of Energy. (2015). *Weather Data Sources*. Retrieved from http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/weatherdata_sources.cfm
- Yagüe, C., Zurita, E., & Martínez, A. (1991). Statistical analysis of the Madrid urban heat island. *Atmospheric Environment. Part B. Urban Atmosphere*, 25(3), 327–332. doi:10.1016/0957-1272(91)90004-X