

LA CLIMATOLOGÍA URBANA EN ESPAÑA EN LOS ÚLTIMOS 30 AÑOS

Felipe Fernández García

Departamento de Geografía
Universidad Autónoma de Madrid

1. INTRODUCCIÓN

La climatología urbana es una rama del clima relativamente reciente, pero su desarrollo ha sido espectacular y en la actualidad ocupa un lugar destacado en el contexto de la climatología general. Surgida en un primer momento ante la evidencia de las transformaciones que la ciudad introduce en el clima regional modificando las características de las principales variables, rápidamente se convierte en una herramienta clave en las políticas de mitigación y adaptación al cambio climático. La incorporación de nuevas técnicas y herramientas como la teledetección y los SIG, la creación y el fácil acceso a bases territoriales como CORINE, URBAN AUDIT o URBANATLAS y la creación de nuevas redes de observación en las áreas urbanas, han sido factores claves en el desarrollo de esta rama de la climatología. No obstante, la falta de redes de monitoreo suficientemente densas, la baja resolución espacial de los modelos climáticos y el escaso intercambio de información entre los climatólogos urbanos y los planificadores son retos aún por solucionar, como se recoge en la propuesta *URBAN-CC: Advanced experimental and modelling approaches in URBAN climate for appropriate heat risk assessment and adaptation measures under Climate Change* (Maja Zuvela-Aloise, 2013).

En nuestro país, tras una década en la que proliferaron los estudios de clima urbano, la mayor parte procedentes del campo de la Geografía, actualmente su número se ha reducido considerablemente, pero se han introducido nuevas tecnologías y métodos de análisis, se han desarrollado otras temáticas como la confortabilidad y se han incorporado grupos procedentes de otras ramas principalmente de las ciencias físicas (Fernández García, F y Martilli, A. 2011).

En las notas que siguen presentamos, en primer lugar, las principales pautas seguidas por la climatología urbana en general y, después, analizamos

la evolución de la climatología urbana en España. En el último apartado, presentamos los resultados obtenidos en Madrid durante la última década, como ejemplo de la situación actual y de las perspectivas futuras de la climatología urbana en nuestro país.

2. LA CLIMATOLOGÍA URBANA: NACIMIENTO Y DESARROLLO

La percepción del clima urbano es muy antigua, o vieja, como señala López Gómez (1993:10), sin embargo la moderna climatología urbana tiene su origen en épocas relativamente recientes y a ello contribuyeron de forma significativa la publicación de tres obras clásicas de la literatura científica: la de Luke Howard sobre el clima de Londres (**The Climate of London**), publicado en 1833; la de Albert Kratzer sobre el clima de las ciudades (**The Climate of Cities**), primero publicada en 1937 (tesis doctoral **Das Stadtklima**) y posteriormente en 1956; y la de Tony Chandler, sobre el clima de Londres (**The Climate of London**), también publicada en 1956. Todas ellas se encuentran disponibles en la web de la Asociación Internacional de Climatología urbana (IAUC: International Association for Urban Climate). <http://www.urban-climate.org/resources/classic-texts/>.

La obra de Chandler es la que ha tenido una influencia más acusada en los estudios de climatología urbana y su modelo de estudio, basado en la creación de una red de estaciones fijas y medidas realizadas en diversos recorridos a través de la ciudad, sigue aún en vigor. La consideración del clima urbano como resultado de las transformaciones realizadas por el hombre, el análisis y evaluación de las consecuencias o impactos de tales transformaciones en el medio urbano y la necesidad de tomar medidas correctoras para evitar el deterioro ambiental de la ciudad, son las principales ideas recogidas en la obra de Chandler y que, con pequeños matices, continúan siendo las líneas principales de investigación en el campo de la climatología urbana.

El gran acierto de la obra de Chandler y el auge que la climatología urbana alcanzó tras su publicación radica en el hecho de que representa un avance de las grandes transformaciones que experimentará pocos años después la climatología, tras la creación del *Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático* o IPCC (**Intergovernmental Panel for Climate Change**) en 1988 y las publicaciones de sus primeros informes en 1990 y 1995. En ellos, como es bien sabido, se demuestra la importancia de la acción del hombre en los cambios observados en el sistema climático, se analizan los impactos de tales cambios y se potencian medidas de mitigación para frenarlos, así como medidas de adaptación para reducir la magnitud de tales impactos. La ciudad se convierte en el laboratorio

ideal para estudiar, a una escala reducida, los mecanismos de cambio y los impactos que el cambio climático produce a escala global.

El clima urbano, en efecto, se define como un clima regional modificado como consecuencia de la acción humana. La ciudad constituye la forma más radical de transformación del paisaje natural y el asfalto, los edificios y el trazado de la red viaria modifican los balances de radiación entre el suelo y el aire, reducen la evaporación, aumentan la escorrentía superficial y disminuyen la velocidad del viento a la vez que aumenta la turbulencia. Todo ello se traduce en un *clima urbano* característico, cuyo rasgo más destacable es el aumento de las temperaturas en la ciudad en relación a las áreas vecinas más frías, efecto conocido como *isla de calor*.

Los primeros estudios se centraron en la génesis y caracterización de la isla de calor; en el último tercio del siglo pasado adquieren mayor interés otros temas centrados en evaluar los impactos de la isla de calor sobre la salud y el confort de los habitantes de las ciudades y desarrollar estrategias tendentes a disminuir tales impactos. Así mismo, en una primera etapa, la climatología urbana se limitó a estudiar las transformaciones provocadas por la ciudad a escala local, sin embargo muy pronto se constató que tales cambios podrían tener repercusiones muy importantes a escala global y que las ciudades son piezas claves en las políticas de mitigación del calentamiento global. Diversos informes (Rosenzweig, C *et al.*, 2011) demuestran que, aunque el área ocupada por las ciudades apenas representa el 2% de la superficie del planeta, en ellas se consume más del 75% de los recursos naturales y de ellas proceden más del 80% de las emisiones de gases a la atmósfera; además la población urbana, que representaba más del 50% de la total en el año 2000, alcanzará la cifra del 70% en 2050 y la mayor parte de esta población se concentrará en ciudades de más de 10 millones de habitantes (UN-HABITAT, 2011).

Las ciudades son, por tanto, las principales causantes del calentamiento global y son, así mismo, las áreas más vulnerables a los efectos negativos de estos cambios. La gravedad de esta situación ha rebasado el ámbito de la climatología urbana en sentido estricto y, como sucede con el cambio climático, ha calado profundamente en los diversos estamentos sociales: las ciudades se organizan en redes para paliar los efectos de estos cambios y mantener una calidad de vida aceptable en el marco de un desarrollo sostenible y las administraciones se plantean como acciones prioritarias en las políticas de gestión y planificación urbana las dirigidas a mitigar la isla de calor, a la construcción de edificios más eficientes desde el punto energético y la aplicación de un urbanismo más acorde con las condiciones climáticas del entorno (EEA, 2012).

Resultado de todo lo anterior es el nuevo auge de la climatología urbana que se enfrenta al reto que supone definir y caracterizar lo que algunos

autores han denominado *el clima urbano ideal*, entendiendo como tal aquel que permita a los habitantes de las ciudades gozar de un aire limpio y una ausencia de estrés, mediante una correcta planificación (Katzshner 2000). Dos son los retos más importantes a los que se enfrenta: el primero, la prevención de situaciones de riesgo asociadas al estrés térmico y, el segundo, la caracterización de las estructuras y materiales urbanos que mejor respondan a la amortiguación de la isla de calor; en relación a ellos, las líneas de investigación prioritarias las podemos agrupar en tres grandes apartados:

- 1ª. El desarrollo de modelos para el análisis del clima urbano, incorporando la teledetección y los Sistemas de Información Geográficos (SIG).
- 2ª. La búsqueda de nuevos índices capaces de reflejar las condiciones de confortabilidad en espacios abiertos y el establecimiento de escalas, que permitan determinar las respuestas de la persona ante unas condiciones climáticas específicas.
- 3ª. La generación de una cartografía climática que sirva de instrumento válido para su aplicación en la planificación urbana.

En el primer grupo se podrían incluir los proyectos realizados en la ciudad sueca de Gotenborg por el Urban Climatology Group (Svensson *et al.*, 2002); el proyecto CLIMLIS, en Lisboa (Alcoforado y Andrade, 2007), o el proyecto FUSE, de la Universidad de Portland (Hart M y Sailor, 2008). También, los programas iniciados por Organismos internacionales, como EURO HEAT, cuyo objetivo es la mejora de las medidas de sanidad pública en caso de condiciones meteorológicas extremas y olas de calor; PHEWE, para la prevención de efectos agudos para la salud de las condiciones meteorológicas en Europa y el CASHh con objeto de estudiar el cambio climático y estrategias de adaptación para la salud humana en Europa. De gran importancia para nuestro país, es el proyecto «*Urban heat island and urban thermography*», financiado por la Agencia Espacial Europea (ESA) y que se está desarrollando en 10 ciudades europeas, pero cuyo punto de partida fue la campaña, DESIREX, desarrollada en Madrid durante el verano de 2008 (Sobrino *et al.*, 2012).

En el segundo, destacan las acciones emprendidas por la Organización Meteorológica Mundial (WMO) y la Sociedad Biometeorológica Internacional (ISB) dirigidas a integrar los diferentes grupos que trabajan en el campo de la bioclimatología para buscar un índice válido para cualquier tipo de clima, época y lugar y susceptible de ser adaptado a las diferentes condiciones ambientales. En esta línea desarrolla sus trabajos la comisión 6 de la ISB, integrada en la COST 730, que bajo el título *Towards a Universal Thermal Climate Index (UTCI) for assessing the thermal environment of the human*

being, inició su trabajo en 2001, bajo la coordinación de Gerd Jendritzky. (Jendritzky *et al.*, 2001 y 2002). Fruto de todo ello es el desarrollo y puesta a libre disposición de los investigadores de herramientas de cálculo de las complejas variables que intervienen en el proceso, como el programa Rayman Pro (Martzarakis, 2007) o BIOKLIMA 2.6 (Michal Blazejczyk, 2012).

La modelización del clima urbano a partir de la integración de las múltiples variables que sobre él influyen y la elaboración de mapas climáticos y de los impactos derivados de ellos en las zonas urbanas es otra de las líneas de investigación en boga en los últimos años. Su objetivo es dotar a los planificadores urbanos de una herramienta capaz de integrar los estudios de clima urbano en las acciones de planificación y ordenación urbanística y en numerosas ciudades se está generando una cartografía urbana en la que, además de representar la distribución de las principales variables climáticas, se definen áreas de actuación prioritarias, en función de la intensidad de los impactos (Ren Chao *et al.*, 2010; Sanginés Coral, D. E., 2013).

3. LOS ESTUDIOS DE CLIMA URBANO EN ESPAÑA

En España los estudios de clima urbano no se inician de forma sistemática hasta bien entrado el siglo XX. En 1984 se publicaron los dos primeros estudios sobre el clima urbano de Madrid, el primero con el título *La isla de calor en Madrid: avance de un estudio de clima urbano* (López Gómez, A. y Fernández García, F., 1984) y el segundo titulado *Madrid: microclima y medio ambiente* (Fernández García, 1984). El objetivo fundamental era la caracterización de la isla de calor a partir de la comparación de las temperaturas registradas en varios observatorios de la red nacional, situados en el entorno del área madrileña; se utilizaron también datos de la red de vigilancia de la contaminación atmosférica del Ayuntamiento de Madrid y observaciones directas con instrumentos de medida situados sobre vehículos en tres direcciones principales (N-S, NE-SW y NW-SE), que atraviesan la ciudad y llega a núcleos de población situados en la periferia urbana. Los resultados se muestran en forma de perfiles y mapas, tal y como los que se reproducen en la (figura 1).

Pronto se incorporan otros grupos de geógrafos a esta línea de investigación y en la década de los 90 son numerosas las ciudades en las que se realizan estudios de clima urbano. Los resultados aparecen recogidos en dos publicaciones claves: la primera, *El clima de las ciudades españolas*, publicada en 1993 (López Gómez *et al.*) y la segunda, *Clima y ambiente urbano en ciudades ibéricas e iberoamericanas*, publicada en 1998 (Fernández García, Galán Gallego y Cañada Torrecilla ed.), que marca el punto culminante de las publicaciones de clima urbano en España.

El tema dominante es la isla de calor urbano, obtenida a partir de las medidas directas en diferentes transectos a lo largo de la ciudad. Imágenes diurnas, obtenidas por el satélite Landsat se utilizaron en Madrid (López Gómez *et al.*, 1990), Valencia (Caselles *et al.*, 1989) y en diversas ciudades de centro peninsular (Pérez González *et al.*, 2003) y en Madrid, además, se utilizaron otras nocturnas obtenidas en vuelos especiales realizados por el Instituto Nacional de Técnicas aeroespaciales (López Gómez *et al.*, 1993 y Fernández García, F *et al.*, 1999). Se realizan varias tesis doctorales (2 en la Universidad Autónoma de Madrid, una sobre la influencia de los parques y jardines y otra sobre la influencia de los núcleos urbanos del área metropolitana madrileña; otras en Barcelona, Tarragona, Zaragoza, Santiago de Compostela y Granada (Moreno, M.C. 2007).

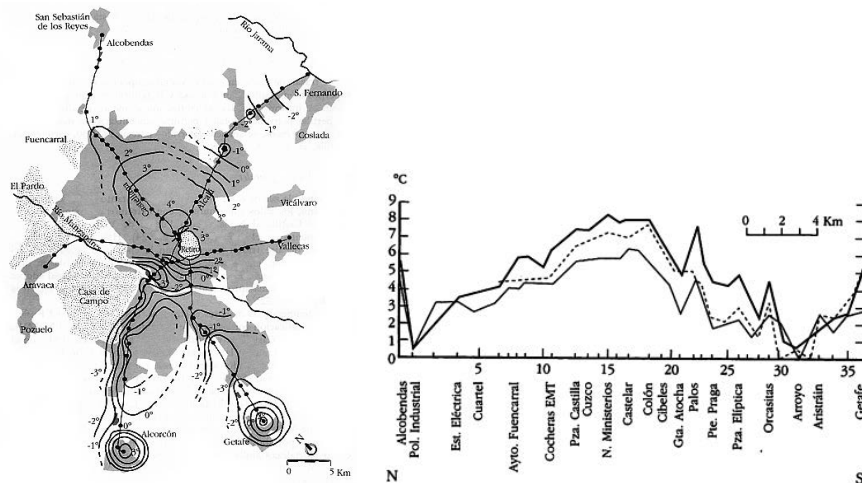


Figura 1. Madrid. Invierno estable. Mapa de isotermas y perfil térmico.
(Fuente: López Gómez *et al.*, 1993:58 y 66).

En la actualidad, los estudios de clima urbano se han reducido considerablemente, pero se han incorporado nuevas tecnologías y métodos de análisis en la modelización de la isla de calor en Zaragoza y Madrid, como el SIG (Cuadrat, J.M. *et al.*, 2005; Serrano, V. *et al.*, 2005; Fernández, F, 2005 y Fernández *et al.*, 2013), la teledetección (Sobrinó *et al.*, 2012, 2013; Fernández *et al.*, 2013), o la integración en modelos regionales de simulación (Salamanca *et al.*, 2012); se han desarrollado otros temas, como los impactos sobre la salud (Raso, 2012; Díaz *et al.*, 2005) o el confort térmico (Fernández, 2001; Fernández y Rasilla, 2012) y se tiende hacia la integración del clima urbano en las políticas de planificación urbanística (Fernández, 2013).

4. LOS ESTUDIOS DE CLIMA URBANO EN MADRID

4.1. El área de estudio

El área metropolitana de Madrid es una zona muy transformada por la acción del hombre, con más del 30% de la superficie de carácter artificial (fig 2). A ello ha contribuido la gran concentración de la población en torno a Madrid, la mayor ciudad de España con 3000.000 de personas en el área urbana y más de 5000.000 en un radio inferior a 50 km en torno a la capital. Además, 1000.000, en torno al 20%, constituyen grupos de riesgo, menores de 5 años y mayores de 65. Además, su situación en el interior de la Península Ibérica, en una zona de topografía poco acusada y con un porcentaje muy elevado de situaciones anticiclónicas, la convierten en el escenario ideal para el estudio del clima urbano.

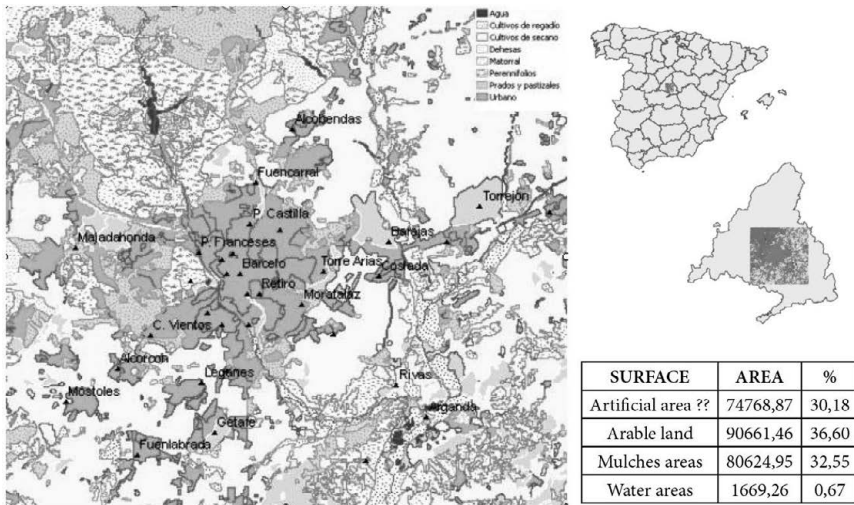


Figura 2. Distribución de usos del suelo en el área metropolitana de Madrid.

Como señalamos anteriormente, estos estudios se iniciaron en 1984 y se han continuado a lo largo de estos años con numerosas publicaciones sobre la isla de calor, el confort, la contaminación atmosférica (López Gómez *et al.*, 1993, Fernández García *et al.*, 2003, Fernández García, 2001-2002 y 2005) y los más recientes tratan sobre la influencia de la isla de calor durante las olas de calor (Fernández y Rasilla, 2008; Fernández *et al.*, 2013), o la propuesta de un Sistema de Información Climático Ambiental en Madrid (Fernández, 2013).

En 2008 se llevó a cabo en nuestra ciudad la campaña DESIREX (Sobrinó *et al.*, 2009), financiada por la Agencia Espacial Europea, con objeto de implementar los métodos que se aplicarán en otras ciudades europeas para prevenir y reducir los impactos de las olas de calor en el marco del

calentamiento global. En 2009 el grupo de investigación GEOCLIMA de la Universidad Autónoma de Madrid inició el proyecto *Clima urbano y confort térmico durante episodios de calor extremo en el área metropolitana de Madrid*, en el marco del Plan Nacional de I+D+i (Rf:CGL2009-10057). El proyecto trata de cuantificar la incidencia de la urbanización en la intensificación del calor durante los periodos extremadamente cálidos, mediante el uso de un *Índice de Calor Acumulado* (ICA); establecer la influencia de los diferentes usos y estructuras urbanas, como la densidad de edificaciones y espacios verdes y definir los umbrales de estrés térmico, mediante el empleo de índices bioclimáticos complejos, como la PET (*Physiological equivalent temperature*).

Los resultados obtenidos se pueden concretar en tres grandes apartados:

- La modelización de la isla de calor en Madrid y su área metropolitana.
- La influencia de la isla de calor en los periodos cálidos extremos.
- La caracterización del régimen de confort medio en el área metropolitana y en la ciudad de Madrid y los principales regímenes de confort dentro de la ciudad en relación a los diferentes usos del suelo y tipologías urbanas.

4.2. Modelización de la isla de calor

Se ha realizado, combinando dos tipos de bases de datos, integradas en un SIG: una geográfica, formada por los usos del suelo y estructuras urbanas procedentes de CORINE, URBAN AUDIT y la otra climática, con datos procedentes de diversas fuentes: los obtenidos mediante transectos a lo largo de la ciudad; los registrados en 27 estaciones meteorológicas pertenecientes a la red Nacional de Meteorología, la red municipal y la red de vigilancia de la contaminación atmosférica y los procedentes de los vuelos realizados durante la campaña del Proyecto DESIREX.

En la figura 3 se muestra el campo térmico superficial y el del aire en la madrugada del día 26/06/2008. Las temperaturas de superficie se han obtenido a partir de la correlación entre los diversos usos del suelo y las temperaturas de las imágenes térmicas captadas por el sensor aerotransportado multiespectral AHS (Airborne Hyperspectral Scanner), propiedad del INTA, siguiendo dos líneas de vuelo N-S y SE-NW, en la campaña DESIREX 2008 (Sobrino *et al.*, 2009) (figura 3).

A esa hora la intensidad de la isla de calor superficial es de 19,3°C y la del aire 13,6°C, en ambos casos las zonas más cálidas coinciden con las áreas urbanizadas y las más frías con las zonas de vegetación y cultivos. Dentro de las áreas urbanizadas se aprecian diferencias en función de la tipología edificatoria: más cálidas las zonas de urbanización continua y menos las edificaciones abiertas y unifamiliares (figura 4).

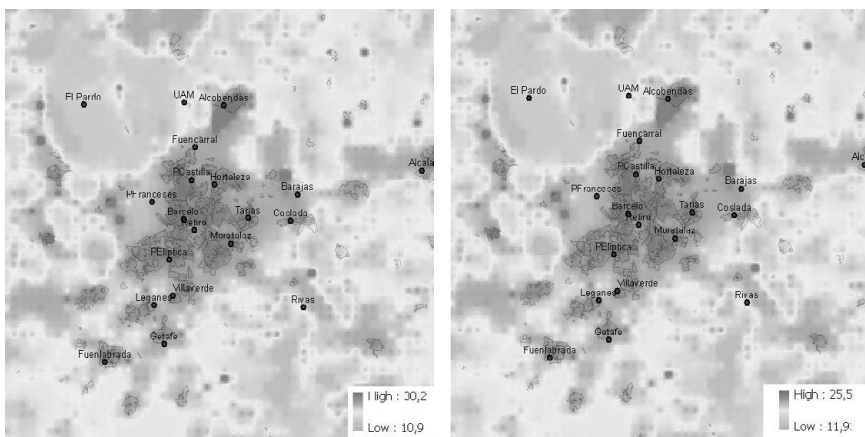


Figura 3. Temperatura del suelo (izquierda) y del aire (derecha) en el área metropolitana de Madrid, obtenidas a partir de las imágenes del proyecto DESIREX en Junio de 2008 a las 4 de la madrugada. (Fuente: Fernández, 2010)

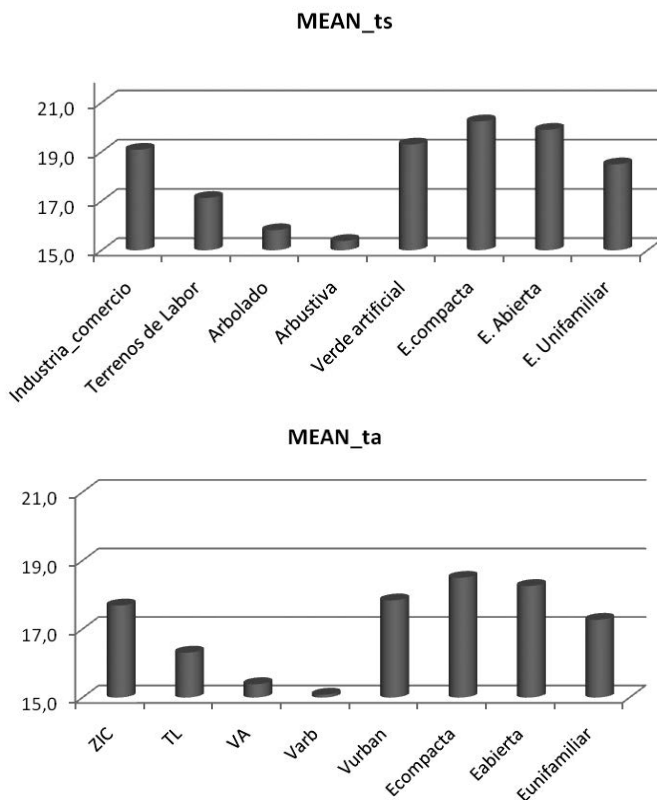


Figura 4. Temperaturas superficiales y del aire asociadas a los usos del suelo (Fuente: Fernández, 2010)

4.3. La isla de calor en los periodos cálidos

Uno de los aspectos más preocupantes en la actualidad es el efecto urbano sobre las olas de calor, cuyos efectos se ven agudizados como consecuencia de la isla de calor urbana. El calor estival es el rasgo dominante del verano en el área metropolitana madrileña y a fin de evaluar la incidencia de la ciudad durante las olas de calor, hemos comparado la frecuencia e intensidad de la isla de calor en el conjunto de los días estivales y en aquellos en los que la temperatura máxima supera los 36,5°C. Como se observa en el cuadro (Tabla 1): en los días cálidos disminuye la frecuencia de isla de calor en las máximas, pero aumenta las mínimas; la intensidad varía poco en las máximas, pero se produce una intensificación de las mínimas, especialmente las superiores a 4°C y 6°C.

Intensidad	Temperaturas máximas		Temperaturas mínimas	
	Verano	Tmx>36,5	Verano	Tmx>36,5
Inf. A 2°C	99,0	100,0	34,7	11,0
2°C-4°C	0,0	0,0	44,9	47,0
4°C-6°C	1,0	0,0	19,7	40,2
Sup. A 6°C	0,0	0,0	0,7	1,8

Tabla 1. Intensidad de la isla de calor para el conjunto de los días estivales y aquellos en los que la Tmx de Barajas supera los 36.5°C (Fuente: Fernández y Martilli, 2011).

El siguiente paso consiste en determinar si el aumento de la intensidad en la isla de calor nocturna en los periodos cálidos supone un exceso respecto a las situaciones medias y su cuantificación. Para ello hemos aplicado el *índice de calor acumulado* a lo largo de las 24 horas del día en diferentes observatorios, a partir de la intensidad horaria de la isla de calor, teniendo en cuenta únicamente los valores positivos.

Los resultados muestran que, efectivamente, en los periodos cálidos se agudizan las diferencias entre las zonas urbanas y rurales con valores que, en las áreas de mayor densidad urbana, pueden alcanzar los 18°C (figuras 5 y 6).

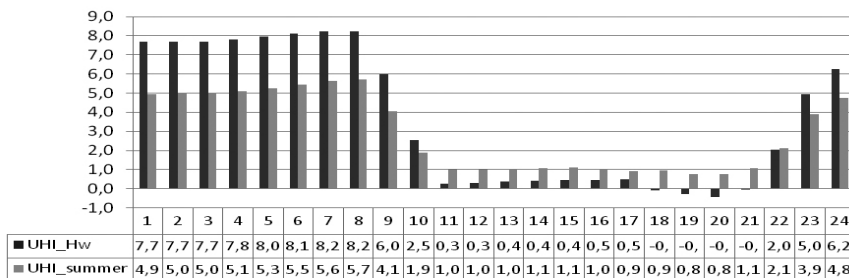


Figura 5. Intensidad horaria de la isla de calor en verano y durante los periodos de ola de calor. (Fuente: Fernández y Martilli, 2011).

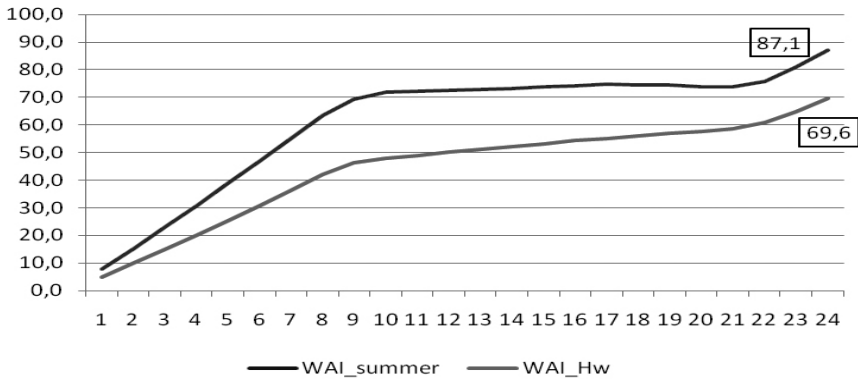


Figura 6. Índice de calor acumulado en verano y durante las olas de calor.
(Fuente: Fernández y Martilli, 2011).

4.4. Caracterización del régimen de confort

Es el tercer aspecto que consideramos de interés. Se aplica como índice de confort la PET, calculada con la aplicación para PC del modelo RAYMAN (Matzarakis *et al.*, 2000; Matzarakis y Rutz, 2005) y los valores utilizados han sido: las temperaturas máximas y mínimas diarias; la velocidad del viento, medidas a las 7 y 18 horas; la humedad relativa máxima y mínima; la nubosidad media y la radiación. Así mismo se ha tenido en cuenta el tipo de vestimenta requerido, aplicando a cada mes el valor medio del índice **clo**, obtenido a partir de las condiciones climáticas medias típica de la zona, calculado con el modelo Bioklima (Blazejczyk, K. *et al.*, 2012).

Zonificación bioclimática: La temperatura fisiológica equivalente presenta una clara distribución espacial en Madrid y su área metropolitana, siendo las áreas urbanizadas las principales responsables de tales diferencias. Tal y como aparece en los mapas de la figura 7, la PET dibuja un archipiélago de puntos cálidos asociados a los núcleos urbanos del área metropolitana. En enero los valores oscilan entre un mínimo de -3.5°C y un máximo de 5°C ; en verano la PET máxima más baja es de 24.7°C y la más elevada de 36.6°C : un invierno con predominio de sensaciones muy frías y un verano con sensaciones cálidas es el rasgo común y característico del bioclima del área metropolitana madrileña y en ambos periodos se observa el contraste entre las zonas urbanas y el resto: la diferencia entre el punto más frío y el más cálido es de 8.8°C , en invierno, mientras que en verano se eleva 11.9°C .

El hecho más destacable es la marcada influencia de las zonas verdes, dibujándose en el mapa de forma muy nítida la mancha fría en invierno y fresca en verano del parque del Retiro y el claro contraste entre el sector SW de la ciudad, de urbanización compacta y escasa vegetación, frente a las zonas más frescas del N y NE, donde predominan las urbanizaciones

abiertas, viviendas unifamiliares y abundante vegetación en las calles y plazas. Este contraste es aún más nítido cuando se representa el total de días extremadamente cálidos, de acuerdo con los valores de la PET, tal y como aparece en la figura 8.

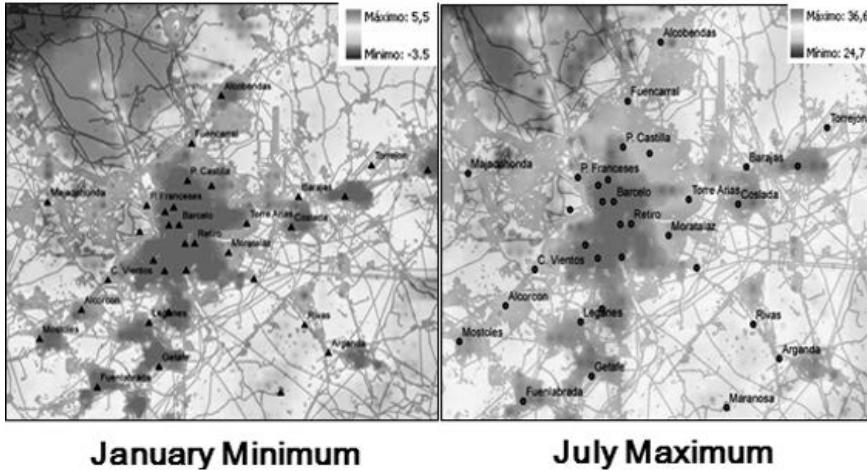


Figura 7. Modelización espacial de la PET media en el área metropolitana de Madrid.
(Fuente: Fernández y Radilla, 2012).

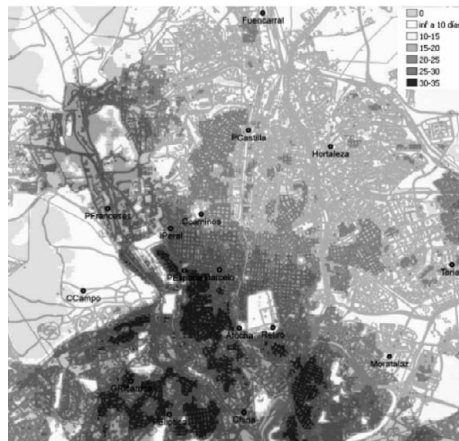


Figura 8. Distribución espacial de los días extremadamente cálidos en Madrid.
(Fuente: Fernández, 2005)

Disminución del frío y aumento del calor es el principal efecto de la ciudad sobre el bioclima regional, pero también, es interesante señalar el aumento de las sensaciones confortables en la ciudad. Sensaciones que se localizan en invierno, periodo en el que los días confortables en la ciudad duplican a los registrados en las áreas periurbanas; en verano, por el contrario, en la ciudad se agudizan las sensaciones cálidas y muy cálidas (figura 9).

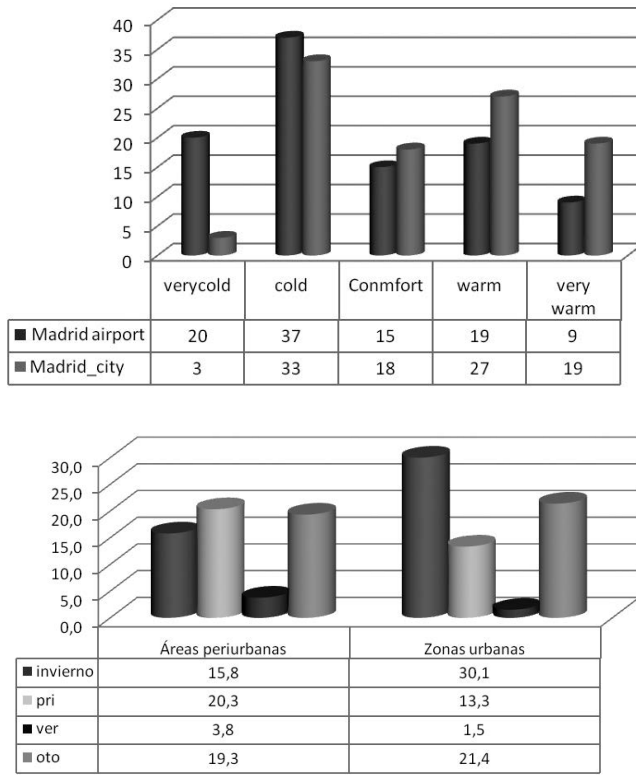


Figura 9. Frecuencia anual de las diferentes sensaciones térmicas en las zonas urbanas y no urbanas y dentro de la ciudad, según densidades de edificación (Fuente: Fernández y Rasilla, 2012).

En el interior de la ciudad las diferentes morfologías urbanas introducen matices, de tal forma que el área metropolitana madrileña podemos diferenciar **tres ambientes bioclimáticos característicos**: uno muy cálido, correspondiente a las zonas más densamente urbanizadas; otro cálido, típico de las zonas con escasa influencia urbana y un tercero, relativamente fresco, claramente influenciado por la vegetación. Esta diferenciación se hace especialmente patente en los periodos extremadamente cálidos, como durante la ola de calor del año 2003: tal y como se puede ver en la figura 10, la ola de calor fue especialmente intensa en las zonas urbanas, donde la PET máxima desde primeros de julio, hasta el 24 de agosto cuando la ola de calor comienza a remitir supera el umbral de extremadamente cálido; en Barajas, únicamente se superó este umbral extremo desde finales de julio al 14 de agosto; en el parque del Retiro, nunca alcanzaron las situaciones extremas. En resumen en los periodos cálidos la ciudad agudiza de forma notable el calor, en relación a las zonas no urbanas y las masas forestales de cierta entidad como el parque del Retiro, actúan de forma muy notable como moderadoras del estrés térmico.

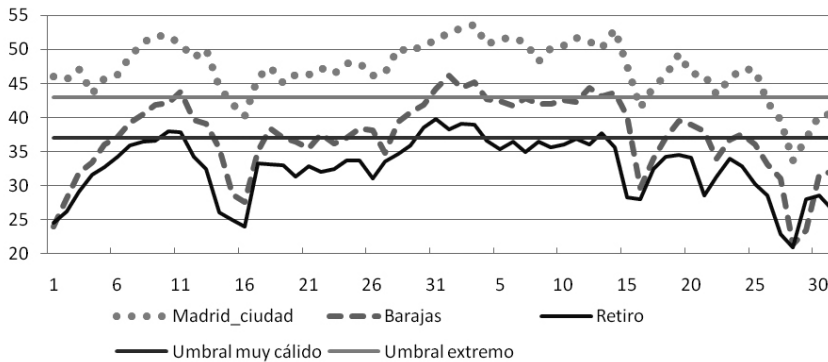


Figura 10. Máximas diarias de la temperatura fisiológica y umbrales de las sensaciones térmicas extremas durante la ola de calor de julio y agosto de 2003 (Fuente: Fernández, 2005).

Con motivo de la revisión general del plan de ordenación urbana de Madrid y en el marco de una obra cuyo principal objetivo es promover el intercambio de ideas entre los diferentes estamentos implicados en el mismo (Vinuesa *et al.*, 2013), presentamos la propuesta de un *sistema de información climático-ambiental (SICAMAD)*, cuya estructura aparece reflejada en la tabla 2 y que incluye tres apartados: El primero consiste en la creación de una base de datos que permita comparar variables climáticas y urbanas; el segundo, trata de evaluar las relaciones existentes entre ambas, mediante la aplicación de técnicas estadísticas y geoestadísticas y el tercero, la modelización espacial de las principales variables y la obtención de mapas climáticos y bioclimáticos a diferentes escalas.

I BASES DE DATOS PRIMARIAS			
Usos del suelo	MDE Modelo digital de elevaciones	Temperatura de superficie DESIREX	Datos meteorológicos Redes meteorológicas
BASES DE DATOS DERIVADAS INTEGRACIÓN DE LAS VARIABLES EN MALLAS RETICULARES (1KM ² /500/ 100 M ²)			
II TÉCNICAS ESTADÍSTICAS Y GEOESTADÍSTICAS FUNCIONES DE CORRELACIONES/INTERPOLACIÓN			
III MODELOS DE DISTRIBUCIÓN ESPACIAL CARTOGRAFÍA A DIFERENTES ESCALAS ÁREA METROPOLITANA/MUNICIPIO DE MADRID/DISTRITOS/BARRIOS			
Mapas climáticos Temperatura, humedad, viento	Mapas bioclimáticos Índices de confort Isla de calor	Mapas calidad del aire NO ₂ /PM ₁₀ /2.5/O ₃ Índices de calidad	

Tabla 2. Esquema y contenidos del Sistema de Información Climático-ambiental de Madrid (SICAMAD). (Fuente: Fernández, 2013).

El objetivo es incorporar el clima urbano en el diseño y planificación de la ciudad del futuro, como elemento clave en la planificación y mejora de la calidad físico ambiental de la ciudad y se integra en esa tercera línea de investigación de la actual climatología urbana, a la que hicimos referencia anteriormente y entre cuyos objetivos destacan la creación de redes meteorológicas específicas para el estudio del clima urbano, la puesta en común de los diversos métodos y técnicas de análisis y la generación de una cartografía climática que sirva de instrumento válido para su aplicación en la planificación urbana (Maja Zuvela-Aloise, 2013; Ren Chao *et al.*, 2010; Sanginés Coral, D. E, 2013).

AGRADECIMIENTO

Esta publicación se inscribe dentro del proyecto *Clima urbano y confort térmico durante episodios de calor extremo en el área metropolitana de Madrid*, en el marco del Plan Nacional de I+D+i (Rf:CGL2009-10057)

REFERENCIAS

- ALCOFORADO, M.J. y ANDRADE, H. (2007): "Nocturnal urban heat island in Lisbon (Portugal): main features and modelling attempts". *Theoretical and Applied Climatology*, 84, 1-3:151-160.
- ALMENDROS, M.A. (1990): *Aspectos climáticos de los parques y jardines de Madrid*. Madrid, Universidad Autónoma, Tesis Doctoral, 2T.
- ALMENDROS, M.A. (1992): "Estudio climático del parque del Retiro (Madrid)". *Estudios Geográficos*, 209:207-239.
- BLAZEJCZYK, K., *et al.* (2012): "Comparison of UHCI to selected thermal indices". *Int J Biometeorol.* 56(3): 515-535.
- CASELLES, *et al.* (1989): "El efecto de la isla térmica de la ciudad de valencia, obtenida a partir de transectos e imágenes NOAA-AVHRR", *III Reunión cinética del Grupo de Trabajo en Teledetección*. Madrid, AET, 259-269.
- CUADRAT, J.M. SAZ, M.A. & VICENTE, S. (2005): "Los efectos de la urbanización en el clima de Zaragoza". *Boletín de la AGE*, 40:311-328.
- DÍAZ JIMÉNEZ, J., *et al.* (2005): "Impactos de las temperaturas extremas en la salud pública". *Revista española de Salud Pública*. 79: 145-157.
- EEA (2012): *Urban adaptation to climate change*. <http://www.eea.europa.eu/publications/urban-adaptation-to-climate-change>
- FERNÁNDEZ GARCÍA, F. (1984): "Madrid: Microclima y medio ambiente". *Universidad y Sociedad. Revista del Centro Regional de Madrid Asociado a la UNED*. 8-9: 241-261.

- FERNÁNDEZ GARCÍA, F. GALÁN GALLEGO, E. y CAÑADA TORRE-CILLA, R. Coord. (1998): *Clima y ambiente urbano en ciudades ibéricas e iberoamericanas*. Madrid Ed.: Parteluz, 606 pp.
- FERNÁNDEZ GARCÍA, F., *et al.* (1999): «Airborne remote sensing as a tool to study the links between land use and urban heat island» en *3rd Historical cities Sustainable Development: The GIS as Desing and Management Suppor*. Siracusa, Italy. 20-21 de abril de 1999. European Comisión. HistocityNetwork.
- FERNÁNDEZ GARCÍA, F. (2001): “Clima y calidad ambiental en las ciudades: propuesta metodológica y aplicación al área de Madrid”. *Proyectos y métodos actuales en Climatología* (Raso, J.M y M. Vide, J. eds.). Barcelona, Publicación de la Asociación Española de Climatología. (AEC), Serie B, nº 1, pp. 41-66.
- FERNÁNDEZ GARCÍA, F. (2001-2002): “El clima urbano de Madrid y su influencia sobre el confort térmico”. *Boletín de la Real Sociedad Geográfica*, T. CXXXVII-CXXXVIII, pp. 169-185.
- FERNÁNDEZ GARCÍA, F., MONTÁVEZ, J.P., *et al.* (2003): “A PCA analisis of the UHI form of Madrid (Spain)”, en *Fifth International Conference on Urban Climate*. Lodz (Polonia). pp. 55-58.
- FERNÁNDEZ GARCÍA, F. (2005): *Bases metodológicas para la creación de Información Bioclimática en Madrid y su área metropolitana*. Madrid, 150 pp. (inédito).
- FERNÁNDEZ GARCÍA, F. (2005): “Contaminación atmosférica y calidad del aire en Madrid: análisis de las concentraciones de SO₂, CO, Ozono y PM₁₀ (1980-2003)”. *Estudios Geográficos*, LXVI, 259, pp. 507-532.
- FERNÁNDEZ GARCÍA, F. y RASILLA, D. (2009): “Urban enhancement of the heat waves in Madrid and its metropolitan area”, en *Geophysical Research Abstracts*, Vol. 11, EGU2009-6123, 2009. EGU General Assembly 2009 6th Annual Meeting of the EMS/ 6th ECAC
- FERNÁNDEZ GARCÍA, F. (2009): “Ciudad y cambio climático: aspectos generales y aplicación al área metropolitana de Madrid”. *Investigaciones Geográficas*, 49:173-195.
- FERNÁNDEZ GARCÍA, F. *et al.* (2010): “Caracterización del régimen bioclimático medio del área metropolitana de Madrid mediante la aplicación de la temperatura fisiológica (PET)”, en *Clima, ciudad y ecosistemas* (Felipe Fernández, Encarna Galán y Rosa Cañada eds). Publicaciones de la Asociación Española de Climatología AEC), Serie A, 7:505-514.
- FERNÁNDEZ GARCÍA, F. (2010): “Cambio climático y espacios urbanos” en *Clima, ciudad y ecosistemas* (Felipe Fernández, Encarna Galán y Rosa Cañada eds). Publicaciones de la Asociación Española de Climatología AEC), Serie A, 7:XXVII-XXII.

- FERNÁNDEZ GARCÍA, F. y MARTILLI, A. (2011): "Urban climate research in Spain". *International Association for Urban Climate*. 40:22-28.
- FERNÁNDEZ GARCÍA, F. y MARTILLI, A. (2012): "El clima urbano: aspectos generales y su aplicación al área de Madrid". *Índice, Revista de Estadística y Sociedad*, 50: 21-24.
- FERNÁNDEZ GARCÍA, F. y RASILLA ÁLVAREZ, D. (2012): "Thermal stress and urban influence in the Metropolitana Area of Madrid", en *Nuevos aires de la Geografía Española del siglo XXI*. Aportación española al XXXIIº Congreso de la Unión Geográfica Internacional. Editorial Comité Español de la UGI/2012.
- FERNÁNDEZ GARCÍA, F. (2013): "El medio ambiente urbano y su integración en el avance del Plan General de Madrid: propuesta de creación de un Sistema de Información Climático Ambiental (SIMACAD)", en *Reflexiones a propósito de la revisión del Plan General de Madrid* (Vinueza, J. et al. Coord...). Grupo TRYS, 183:206.
- FERNÁNDEZ GARCÍA, F., et al. (2013): "La isla de calor en Madrid y sus implicaciones sobre la salud y el estrés térmico en periodos cálidos" en *Reflexiones a propósito de la revisión del Plan General de Madrid* (Vinueza, J., et al. Coord.). Grupo TRYS, pp. 229-254.
- FERNÁNDEZ GARCÍA, F. y RASILLA ÁLVAREZ, D. (2013): "Extreme warm events and urban confort in the metropolitana rea of Madrid: proposal of an urban heath index (UHINDEX)", en *Tow hundred years of urban meteorology* (Georgiadis M. A., et al.), 144:152.
- HART M y SAILOR D.J. (2008): "Quantifying the influence of land-use and surface characteristics on spatial variability in the urban heat island," *J. Theor. Appl. Clim.*
- JENDRITZKY, G., et al. (2001): "Looking for a Universal Thermal Climate Index UTCI for Outdoor Applications", en *Windsor-Conference on Thermal Standards*, April 5-8, 2001, Windsor, UK.
- JENDRITZKY, G., et al. (2002): "An Update on the Development of a Universal Thermal Climate Index", en *15th Conf. Biomet. Aerobiol. and 16th ICB02*, 27 Oct - 1 Nov 2002, Kansas City, AMS, pp. 129-133
- LÓPEZ GÓMEZ, A. y FERNÁNDEZ GARCÍA, F. (1984): "La isla de calor en Madrid: avance de un estudio de clima urbano". *Estudios Geográficos*, 174: 5-34
- LÓPEZ GÓMEZ, A. y FERNÁNDEZ GARCÍA, F., et al. (1990): "La temperatura diurna en la Aglomeración de Madrid, mediante imágenes remotas". *Estudios Geográficos*, 201: 705-732.
- LÓPEZ GÓMEZ, A. y J., FERNÁNDEZ GARCÍA, F. y MORENO JIMÉNEZ, A. (1993). *El clima urbano. Teledetección de la isla de calor en Madrid*. Madrid, Ministerio de Obras públicas y Transportes, Serie Monografías. 230 pp.

- LÓPEZ GÓMEZ, A., FERNÁNDEZ GARCÍA, F., *et al.* (1993). *El clima de las ciudades españolas*. Ed.: Madrid, Cátedra, 268 pp.
- MATZARAKIS, A., *et al.* (2007): "Modelling Radiation fluxes in simple and complex environments - Application of the RayMan model". *Int. J. Biometeorol.* 51:323-334.
- MARTÍN VIDE, J., *et al.* (2003): "Spatial differences in the urban heat island of the pre and post Olympic Barcelona (Spain)". *Fifth International Conference on Urban Climate*. Vol 1, Lodz, pp. 91-102.
- MONTÁVEZ, J.P., *et al.* (2000): "A study of the urban heat island of Granada". *Internationsl Journal of Climatology*, 20: 899-911.
- MORENO, M.C. (1993): "Intensity and form of the urban heat island in Barcelona". *International Journal of climatology*, 14:705-710.
- MORENO, M.C. (2007): "Urban climatology", en *Spanish climatology. Past, present and future* (Cuadrad & Martín Vide, ed). Prensa Universitaria de Zaragoza, pp. 191-205.
- MORENO, M.C. (2012): "Cambio climático y espacios urbanos" en *Clima, ciudad y Ecosistemas* (Fernández García *et al.* Coord.). Publicaciones de la Asociación Española de Climatología (AEC). Serie B, 5:135-140.
- PÉREZ GONZÁLEZ, M.E., *et al.* (2003): "Análisis del clima urbano a partir de imágenes de satélite en el centro peninsular español". *Anales de Geografía d ela Universidad Complutense*. 23:187-206.
- RASO, J.M. (2012): "Clima y salud humana: impactos del cambio climático" en *Clima, ciudad y ecosistemas* (Felipe Fernández, Encarna Galán y Rosa Cañada eds). Publicaciones de la Asociación Española de Climatología AEC), Serie A, 7:71-126.
- REN CHAO, *et al.* (2010): "Urban climatic map studies: a review". *International Journal of Climatology*. DOI: 10.1002/joc.2237
- ROSENZWEIG, C., *et al.* edit (2011): *Climate Change and Cities. First Assessment Report of the Urban Climate Change Research Network*. Cambridge University Press. Urban Climate Change Research Network Center for Climate Systems Research Earth Institute, Columbia University. 312 pp.
- SALAMANCA, F., MARTILLI, A. & YAGÜE, C. (2012): "A numerical study of the Urban Heat Island over Madrid during the DESIREX (2008) campaign with WRF and an evaluation of simple mitigation strategies". *International Journal of Climatology*. 32, 15, pp. 2372-2386.
- SANGINÉS CORAL, D. E. (2013): *Metodología de evaluación de la isla de calor urbana y su utilización para identificar problemáticas energéticas y de planificación urbana*. Tesis Doctoral, dirigida por Turégano Romero,

- J.A. Grupo de Energía y Edificación, Universidad de Zaragoza. 205 pp.
- SERRANO, V., *et al.* (2005): "Spatial patterns of the urban heat island in Zaragoza (Spain)". *Climate Research*, 30:61-69.
- SOBRINO, *et al.* (2009): DESIREX 2008: "Estudio de la isla de calor en la Ciudad de Madrid", *Revista de Teledetección*. 31: 80-92.
- SOBRINO, J.A. y Oltra Carrión, R. (2012): "La campaña DESIREX en Madrid. Determinación de la isla de calor" en *Clima, ciudad y Ecosistemas* (Fernández García *et al.* Coord.). Publicaciones de la Asociación Española de Climatología (AEC). Serie B, 5:127-134 y 141-164).
- SOBRINO, J.A., *et al.* (2013): "Evaluation of the surface urban heat island effect in the city of Madrid by thermal remote sensing". *International Journal of Remote Sensing*. V. 34, pp. 9-10.
- SVENSSON, M., ELIASSON, I., HOLMER, B., (2002): "A GIS based empirical model to simulate air temperature variations in the Göteborg urban area during the night". *Climate Research*, 22(3), pp. 215-226.
- U-HABITAT (2013): *State of the World's Cities 2012/2013*, Prosperity of Cities State of the World's Cities (iSeries title), 207 pp.
<http://www.unhabitat.org/pmss/listItemDetails.aspx?publicationID=3387>
- VINUESA, *et al.*, Coord (2013): *Reflexiones a propósito de la revisión del Plan General de Madrid*. Grupo TRYS, Universidad Autónoma de Madrid, 623 pp. Disponible de forma gratuita en: <https://www.dropbox.com/s/qicldhiow5rb8f/Libro%20290713%20FINAL%20ISBN.pdf>
- ZUVELA ALOISE, M. (2013): *URBAN-CC: Advanced experimental and modelling approaches in URBAN climate for appropriate heat risk assessment and adaptation measures under Climate Change*. Propuesta preliminar (Julio de 2013).