

***Caracterización del
régimen bioclimático
medio del área
metropolitana de Madrid,
mediante la aplicación de
la temperatura fisiológica
(PET)***

Felipe Fernández García

Grupo GEOCLIMA
Universidad Autónoma de Madrid
felipe.fernandez@uam.es

Encarna Galán

Grupo GEOCLIMA
Universidad Autónoma de Madrid

Rosa Cañada

Grupo GEOCLIMA
Universidad Autónoma de Madrid

CARACTERIZACIÓN DEL RÉGIMEN BIOCLIMÁTICO MEDIO DEL ÁREA METROPOLITANA DE MADRID, MEDIANTE LA APLICACIÓN DE LA TEMPERATURA FISIOLÓGICA (PET)

Felipe Fernández García
Encarna Galán
Rosa Cañada

RESUMEN: En este trabajo hemos caracterizado el bioclima del área madrileña a partir de los datos diarios del observatorio del aeropuerto de Barajas. Hemos obtenido la temperatura fisiológica (PET), máxima y mínima diaria, durante el periodo 1985-2004 y los diferentes umbrales de confort, siguiendo la metodología propuesta por la comisión 6 de la ISB. Se observa que, a partir de 2000, han aumentado los días extremadamente cálidos y se han adelantado estas situaciones a los meses de mayo y junio, descendiendo significativamente en Septiembre.

PALABRAS CLAVE: bioclima, Madrid, temperatura fisiológica.

ABSTRACT: In this paper we have characterized the bioclimate of Madrid on the basis of daily data from the observatory at Barajas Airport. We obtained the daily maximum and minimum physiological temperature (PET) during the period from 1985 to 2004. We also obtained the different comfort thresholds by following the methodology proposed by Committee 6 of the ISB. There was an increase in the number of extremely hot days from 2000 onwards and a prolongation of these conditions that includes the months of May and June, as well as a significant decline in September.

KEYWORDS: bioclimatology, Madrid, Physiological Equivalent Temperature (PET)

1. Introducción

En 1902 Philih Hauser publica su conocida obra «Madrid desde el punto de vista médico social» en la que dibuja una ciudad insalubre y con un alto riesgo de

epidemias y enfermedades atribuidas a las modificaciones que sobre el medio natural introduce una gran urbe, «cuyas emanaciones y deyecciones infectan el suelo y el aire, alterando al mismo tiempo las condiciones climatológicas naturales»; hoy,

cuando ha pasado más de un siglo desde esta visión, Madrid continúa siendo una ciudad contaminada, inconfortable y ambientalmente insostenible. El marco socioeconómico es muy diferente al de entonces, ya que a comienzos del siglo pasado pobreza era sinónimo de mala calidad de vida, hoy los problemas son propios de una sociedad desarrollada, cuya capacidad de transformación del medio natural se ha incrementado de forma notable: el clima urbano es uno de los mejores ejemplos de la acción modificadora del hombre, que es capaz de convertir la ciudad en una isla de calor y su atmósfera en una mezcla de gases contaminantes, con consecuencias muy negativas para la salud y el bienestar de sus habitantes.

Los estudios de clima urbano se enfrentan hoy a los retos que plantean las demandas de una sociedad preocupada, no tanto por conocer las características y mecanismos de ese clima, cuanto por las propuestas y medios para amortiguar sus efectos, tales como disminuir el calentamiento urbano, o conseguir un clima capaz de crear las mejores condiciones de confortabilidad. Todo ello supone un importante cambio en las líneas de investigación prioritarias en este campo, que son ahora las que analizan las relaciones del clima con el hombre, o el hombre y su ambiente atmosférico: la bioclimatología es la rama emergente de la actual situación y la que está experimentando los mayores cambios metodológicos para hacer frente a estas demandas.

El área metropolitana de Madrid es una zona eminentemente urbana, con una ciudad como Madrid de más de dos millones de personas y una serie de núcleos periféricos con poblaciones superiores a cien mil habitantes; en conjunto son más de cinco millones las personas que se concentran en un radio no superior a 50 km en torno a la ciudad. El efecto urbano sobre el clima es

muy importante y en los últimos años se observa un incremento en la frecuencia y duración de las olas de calor (Fernández García y Rasilla Álvarez, 2008). Establecer los umbrales a partir de los cuales se puede considerar estos eventos cálidos como fenómenos extraordinarios y de qué forma influye la ciudad y, en general, los diferentes usos del suelo, es uno de los temas prioritarios de la actual climatología urbana.

El clima urbano es un clima regional modificado, por ello el paso previo para poder evaluar la incidencia de la ciudad, consiste en definir las condiciones medias o *normales* de la zona, derivadas de los factores naturales del clima regional. Es lo que se pretende con estas notas: una aproximación a las condiciones climáticas naturales del área metropolitana de Madrid, desde la óptica bioclimática, es decir tratando de definir las diferentes situaciones de estrés térmico a las que se ve sometido el organismo humano, mediante el empleo de un índice capaz de integrar las diferentes variables que, de forma conjunta, contribuye al mismo.

El trabajo forma parte de un estudio más amplio, que estamos realizando con el fin de conocer mejor las características bioclimáticas de nuestra zona, la influencia de la urbanización y, en general de los diferentes usos del suelo, así como plantear medidas tendentes a mejorar las condiciones ambientales de Madrid. El trabajo se ha estructurado en tres apartados, los dos primeros tratan de analizar los métodos de estudio y los focos de interés de la actual climatología urbana, el cuarto analiza las características bioclimáticas del entorno madrileño, definiendo los valores medios de los diferentes umbrales de estrés térmico, definidos a partir de la temperatura fisiológicas (PET: *physiological equivalent temperature*), uno de los índices que está alcanzando mayor difusión en el contexto de la bioclimatología europea.

2. La climatología urbana ante los retos actuales: la componente bioclimática del clima urbano

La ciudad es uno de los principales focos de emisiones de GEI y, al mismo tiempo, una zona de especial vulnerabilidad a los impactos del calentamiento global, tanto por la agudización del calor por el efecto urbano, como por la gran concentración de personas que habitan las ciudades. La gravedad de esta situación ha rebasado el ámbito puramente científico y 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 los gobiernos destacan como líneas prioritarias de sus políticas científicas las que se dirigen a reducir los impactos del hombre sobre el clima. En el caso concreto de España, El Ministerio de Medio Ambiente, a través de la «Oficina Española del Cambio Climático» ha elaborado el «Plan Nacional de Adaptación», que en lo referente al urbanismo y la construcción, señala que las estrategias de ordenación del territorio y los planes urbanísticos deben prestar una atención especial a la información climática, tanto para la elaboración de la normativa técnica sobre edificación, como para una adecuada realización de los proyectos que considere la situación climática de la localidad donde se ubican los edificios. Ello supone desarrollar estudios que permitan la elaboración de normas que conduzcan al aprovechamiento óptimo de las condiciones climáticas en los sectores urbanístico y de la construcción.

La situación que acabamos de describir ha supuesto cambios importantes en los objetivos y métodos de la climatología urbana actual, cuyo interés prioritario se focaliza en dos aspectos fundamentales: por un lado, el estudio de los procesos y meca-

nismos capaces de amortiguar la isla de calor, por otro, la mejora en la calidad del aire en las ciudades (Souch y Grimmond, 2006). Se trata, con ello, de prevenir con antelación los extremos térmicos y de crear las condiciones que mejor se adapten a los cambios previstos; o lo que es lo mismo, la caracterización de lo que algunos autores han denominado “el clima urbano ideal”, entendiéndolo 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). Ello supone potenciar la componente bioclimática, con especial preferencia hacia la evaluación del impacto termofisiológico del entorno atmosférico, que en las áreas urbanas alcanzan valores preocupantes.

La atmósfera, en efecto, es la parte del entorno con el cual el organismo humano está en permanente estado de adaptación debido a las continuas variaciones que sus componentes presentan, tanto los relacionados con el complejo térmico (radiación, temperatura, humedad y viento), como con el conjunto químico que constituyen los diversos componentes del aire (Fig. 1).

En una atmósfera urbana estos dos conjuntos de variables sufren importantes modificaciones: las térmicas debido a todos los procesos energéticos que se producen en el interior de la ciudad y que comprende los flujos de radiación, asociados al calor latente y sensible, así como los flujos de calor almacenado en el suelo, los edificios y el generado por el hombre y sus actividades; la composición del aire se modifica debido a la contaminación, que incluye todo el proceso que comienza con las emisiones de los diferentes contaminantes y finaliza con la deposición de los mismos. La combinación de un espacio construido y unas actividades desarrolladas en la ciudad dan lugar a un sistema ambiental complejo y con repercusiones importantes sobre la salud y el bienestar de sus habitantes, tal y como se muestra en la figura 2.

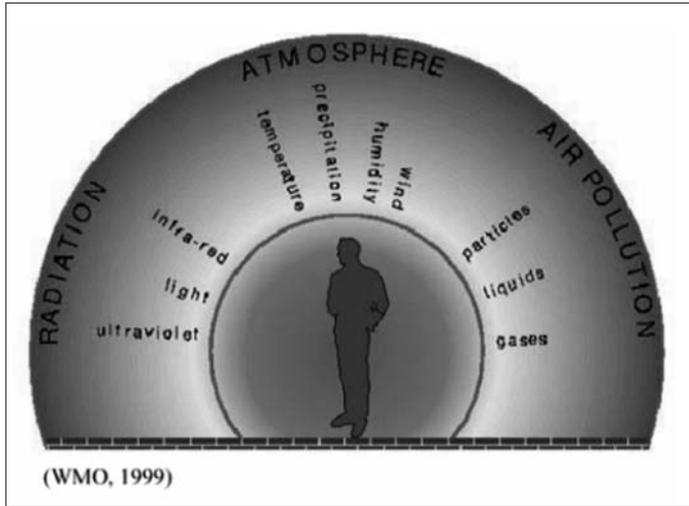
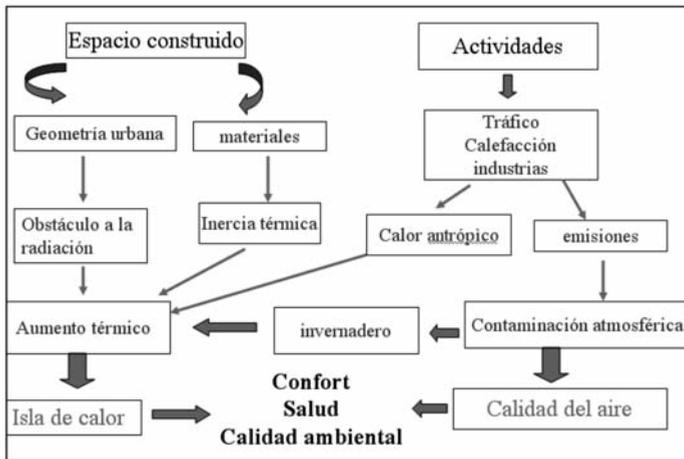


Fig. 1. El hombre y ambiente atmosférico.



Fuente: Fernández García, F.

Fig. 2. Sistema ambiental urbano.

La ciudad, en definitiva, aparece como un espacio de alto riesgo, especialmente en verano cuando el tráfico, los materiales, el trazado de las calles y el tipo de construcción, no adaptados a las condiciones climáticas, convierten el centro urbano en

una zona muy cálida; por su parte, el uso intensivo de energía concentrado en las áreas urbanas, las convierte en la principales fuentes de emisión de gases contaminantes y una seria amenaza para la salud humana.

Calidad del aire y confortabilidad climática son los dos factores de riesgo más acusados en las áreas urbanas, tanto por sus efectos directos sobre la mortalidad y morbilidad, como por el gran número de personas potencialmente expuestas. Numerosos informes demuestran una clara relación entre el aumento de la mortalidad y morbilidad y la exposición a largo plazo a diversos contaminantes (EEA, 2002 y 2005; Medina *et al.*, 2000). El aumento de la mortalidad y morbilidad provocados por las olas de calor es, también, un hecho demostrado y ha disparado las alertas y aumentado la sensibilidad de la población en numerosos países de nuestro entorno, especialmente tras los devastadores efectos de la reciente ola de calor de 2003 (García y Alberdi, 2004; Fischer *et al.*, 2004). En un reciente informe realizado por encargo de la Organización Mundial de la Salud (Coppe *et al.*, 2004), se indica que las olas de calor constituyen uno de los mayores riesgos para la población de las áreas urbanas, donde alcanzan especial virulencia como consecuencia del efecto de isla de calor y se recomienda como método de estudio el análisis de la acción conjunta de la temperatura, humedad, viento y radiación emitida por las superficies urbanas, variables todas ellas que de forma conjunta intervienen en el balance energético entre el hombre y su entorno.

3. La experiencia bioclimática en espacios abiertos

1. Índices bioclimáticos. La bioclimatología estudia las interacciones entre los procesos atmosféricos y los seres vivos. El objetivo final de las investigaciones en el campo de la bioclimatología es cuantificar las sensaciones térmicas y establecer escalas, que permitan determinar las respuestas de la persona ante unas

condiciones climáticas específicas. Todos los investigadores utilizan una metodología similar, consistente en el análisis combinado de diversas variables climáticas para obtener un índice sintético capaz de expresar las sensaciones térmicas experimentadas por el organismo humano; a partir de estos índices se definen diversas categorías de sensaciones, que van desde las muy frías a las muy cálidas (Fernández García, 1996).

Los primeros índices aparecen a finales del siglo XIX, desde entonces, se han sucedido las investigaciones en este campo dando lugar a la existencia de más de 150 índices de confort. La mayor parte de ellos tienen como objetivo determinar las condiciones de confort en el interior de los edificios, por ello su aplicación a espacios abiertos, como sería el caso de la ciudad, plantea importantes limitaciones. La primera deriva de que en espacios interiores se pueden controlar las diferentes variables que influyen sobre el confort, la segunda, por el carácter estático de estos índices que no consideran de forma adecuada las modificaciones que introducen el tipo de actividad, la ropa o las mismas condiciones climáticas, muy cambiantes tanto en el tiempo como en el espacio.

Para espacios exteriores, dos son los índices que han alcanzado mayor predicamento: el Wind Chill, o poder de enfriamiento por el viento y el THI, o índice termohigrométrico. El primero, combina la temperatura y la velocidad del viento y su uso está muy extendido en los climas fríos (Maarouf y Bitzos, 2000; Kessler, 1993, Bluestein y Zecher, 1999); el índice termo higrométrico, trata de describir las condiciones de equilibrio en zonas cálidas mediante la combinación de la temperatura y la humedad del aire (Fernández García, F. 2001; Unger, J. 1999). También estos dos índices presentan importantes limitaciones, debido a que ninguno de ellos integra todos los mecanismos y procesos que intervienen

en el balance energético entre el organismo humano y su entorno, por lo que sólo pueden ser aplicables a determinados climas o estaciones lo que dificulta su generalización.

Por ello, desde la segunda mitad del siglo pasado se viene trabajando en una línea tendente a la búsqueda de nuevos índices capaces eliminar estas limitaciones. Especialmente interesantes han resultado los estudios llevados a cabo para el acondicionamiento de espacios abiertos en Sidney con motivo de los Juegos Olímpicos (Pickup y Dear, (1999) y en Sevilla con motivo de la Expo 92 (Álvarez *et al.*, 1992); o los aplicados a la planificación (Jendritzky y Grätz, 1998) y en los estudios sobre la salud y la calidad ambiental en zonas urbanas (Höppe, 1999; Kalstein y Green, 1997; Blazejczyk, 1994 y 1996).

2. El índice térmico universal o UTCI. A pesar de los indudables avances que se han producido, no existe un consenso a la hora de establecer el mejor método o el índice más adecuado y la dispersión sigue predominando en los estudios bioclimáticos. Para hacer frente a esta situación la Organización Meteorológica Mundial (WMO) y la Sociedad Biometeorológica Internacional (ISB), han potenciado actuaciones dirigidas a integrar los diferentes grupos de trabajo para intentar 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, 2002).

Su principal objetivo consiste en establecer unas pautas metodológicas que permitan integrar a la bioclimatología en las nuevas líneas de investigación y adaptarla a

las nuevas demandas sociales, como la prevención, a corto plazo, de situaciones de riesgo asociadas a los eventos climáticos extremos y, a medio y largo plazo, la mejora y adecuación a las condiciones ambientales de las áreas edificadas. El grupo ha centrado sus trabajos en la revisión y puesta al día de tres aspectos:

— La modelización del balance energético del cuerpo humano en espacios exteriores y la identificación de las variables meteorológicas que influyen en este balance, con especial referencia a los flujos de radiación y la temperatura radiante;

— La elección del índice que mejor se adecúe a las diferentes y variadas condiciones ambientales y que integre, además de las variables meteorológicas, otras como el tipo de vestido o las diferentes actividades que el ciudadano desarrolla;

— La formulación de las escalas de sensaciones y los umbrales que mejor representen la percepción ambiental, incluyendo los factores de adaptación, tanto a las condiciones medias de una zona, como a los cambios que a corto plazo puedan producirse.

2.1. El modelo de simulación y el índice de confort. Los modelos de simulación tratan de describir matemáticamente el balance de energía del cuerpo humano mediante una combinación racional/empírica de ecuaciones que tratan de aproximarse al comportamiento real (Álvarez *et al.*, 1992). Los índices, por su parte, tratan de sintetizar de forma numérica las sensaciones a las que se ve sometido el organismo; generalmente se expresan en unidades térmicas (°C) y con ellos se puede caracterizar y describir las condiciones bioclimáticas de un lugar, tanto a escala espacial, como su régimen anual, estacional o diario.

En espacios abiertos los factores de estrés térmico son mucho más complejos que en espacios cerrados y, tal y como se puede observar de forma gráfica en la figura 3, en la ciudad los diferentes componentes del

escenario urbano (asfalto, paredes de los edificios, zonas verdes etc.) se convierten en los principales protagonistas del estrés térmico, especialmente durante los periodos cálidos cuando a la temperatura del aire se añade la radiación emitida por todos estos componentes. Es fundamental, por ello, que tanto el modelo como el índice seleccionado, reproduzcan lo más fielmente posible esta complejidad.

El modelo de simulación utilizado por la Comisión 6 de la ISB, (Cuadro I) se basa en más de 10^4 combinaciones en las que intervienen parámetros meteorológicos (radiación, temperatura, humedad y viento) y otros relacionados con el factor de aislamiento de la ropa. (Fiala *et al.*, 1999 y 2001).

En cuanto al índice, se ha optado por la **temperatura fisiológica equivalente o**

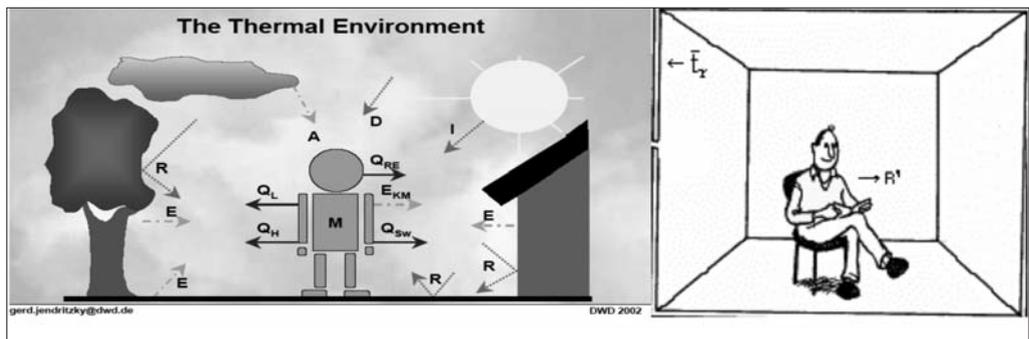


Fig. 3. Variables que influyen en el confort térmico en espacios abiertos (izquierda) y en espacios cerrados (derecha).

Cuadro I. Parámetros utilizados en el modelo de FIALA.

Variables meteorológicas:

- Temperatura del aire desde los 40°C hasta +45°C, con incrementos de 5°C;
- Humedad relativa entre 5% y 95%, con incrementos del 15%;
- Velocidad relativa del viento de 1,1, 2,2, 4,4, 8,8 y 17,6 m s⁻¹;
- Temperatura radiante media para desviaciones respecto a la del aire (T_a-T_{mr}) desde -10 a +40°C

Ropa:

- 0,4 clo para temperaturas entre 15°C y 35°C
- 0,9 entre 5°C y 25°C
- 1,8 entre -15°C y 5°C
- 2,6 entre -40°C y -10°C.

Otras características:

- Varón de 73.5 kg de peso y 1,75 m de estatura,
- caminando a 4 km/h en terreno llano, equivalente a una producción de calor interno de 135 W/m², o 2,3 met

PET, en sus siglas en inglés (*Physiological Equivalent Temperature*). Se define como la temperatura de un entorno de referencia, en el que la percepción de frío o calor sería la misma que en las circunstancias reales. Así, una PET de 43°C indica que el ocupante de una sala en la que la temperatura del aire fuese de 43°C, alcanzaría el mismo grado de

estrés térmico que en las condiciones externas donde se registra el valor enunciado (Höppe, 1999). En el espacio de referencia las condiciones ambientales se reducen a una temperatura media radiante igual a la del aire; una velocidad del aire de 0,1 m/s y humedad relativa del 50%; en estas condiciones la neutralidad térmica, o lo que es lo mismo, la

Cuadro II. Valores de la PET en diferentes ambientes.

	T °C	T _{mr} °C	V m/s	V _p hPa	PET °C
En espacio interior	21	21	0.1	12	21
Invierno al sol	-5	40	0.5	2	10
Invierno a la sombra	-5	-5	5	2	-13
Verano al sol	30	60	1	21	43
Verano a la sombra	30	30	1	21	29

Fuente: Höppe, 1999

sensación de confort se alcanza con una de PET de 20°C. Cuando se modifican algunos de estos valores el valor de la PET y, consecuentemente, la sensación térmica, tal y como se muestra en la Cuadro II.

Todo esto es válido para una persona de 35 años, varón, de 1,75 metros de estatura y 75 kg de peso; el vestido es el adecuado a las condiciones normales del entorno, 0,5 clo en verano y 1,8 en invierno y su actividad se reduce a un paseo tranquilo, 4 km/h, y en terreno llano, lo que representa una producción de calor interno equivalente a 2 met.

Volviendo al Cuadro II, es interesante observar las importantes desviaciones que con respecto a la temperatura del aire experimenta la PET, en función de los valores de la temperatura radiante: así en un día con 30°C de temperatura ambiente, la temperatura radiante puede alcanzar 60°C y el valor del índice los 43°C; si ambas temperaturas, la del aire y la radiante, se igualan el índice desciende a 29°C. Esta gran

diferencia parece reflejar bastante bien la realidad, especialmente en las zonas exteriores donde, como cualquiera de nosotros habrá experimentado, las condiciones térmicas pueden variar muy rápidamente y de forma notoria al pasar de la sombra al sol, o por una zona asfaltada o cubierta de césped.

La inclusión de la temperatura radiante es el aspecto que convierte a la PET en uno de los índices más adecuados para su aplicación en espacios abiertos, donde la temperatura del aire y muy especialmente en los días cálidos de verano, no es suficiente para diferenciar los matices relacionados con los diferentes usos del suelo. Estudios realizados en varias ciudades europeas (Matzarakis *et al.*, 1999; Svenson *et al.*, 2002; Andrade, 2003; Jendritzky *et al.*, 2002; Gratz *et al.*, 1992; Friedrich *et al.*, 2001; Matzarakis y Rutz, 2005; Gulyas *et al.*, 2003) demuestran la utilidad e importancia de la temperatura radiante para

caracterizar los matices bioclimáticos que se producen dentro de las ciudades como consecuencia de los diversos materiales, usos del suelo y estructuras que aparecen en ellas.

2.2. Escalas de sensaciones. Es el otro aspecto necesario para definir y caracterizar desde la óptica bioclimática las condiciones de un lugar, sin embargo, establecer los umbrales a partir de los cuales cambian las sensaciones térmicas continúa siendo tema de discusión y estudio, puesto que están muy

influenciadas por factores psicológicos o personales que dificultan su generalización.

Inicialmente, los umbrales se fijan a partir de las correlaciones entre las variables físicas y las sensaciones que experimentan grupos de individuos, sometidos a diversas situaciones de estrés y en ambientes controlados. La realidad exterior es mucho más compleja, por lo que estos umbrales no pueden ser interpretados en términos absolutos y la misma escala puede dar lugar a sensaciones térmicas diferentes, tal y como

Cuadro III. Sensaciones térmicas en función del tipo de clima para valores similares de temperatura fisiológica equivalente.

PET °C	Sensaciones térmicas	
	Clima templado	Clima tropical
Inf. 4	Muy frío	Extremadamente frío
De 4 a 8	Frío	Muy frío
De 8 a 12	Fresco	Frío
De 12 a 16	Ligeramente fresco	Fresco
De 16 a 20	Neutro	Ligeramente fresco
De 20 a 24	Ligeramente cálido	Neutro
De 24 a 28	Cálido	Ligeramente cálido
De 28 a 32	Caluroso	Cálido
De 32 a 36	Muy cálido	Caluroso
De 36 a 40	Extremadamente cálido	Muy cálido
Sup. A 40		Extremadamente cálido

Fuente: Höppe, 2000

se muestra en el Cuadro III, en el que se indican las sensaciones en un clima templado, típico de la Europa centro occidental y un clima tropical húmedo.

Las mismas consideraciones se podrían hacer a una escala menor, tal y como hemos señalado en otros estudios (Fernández y Moreno, 2004), la escala de sensaciones no es la misma para un habitante de la sierra

madrileña, que para uno del la campiña, tampoco se puede considerar los mismos umbrales de frío o calor, en invierno o verano. Además, desde hace tiempo se conoce la relación que tiene la temperatura con la morbilidad y mortalidad y que la mayor tasa de mortalidad ocurre a temperaturas más elevadas en las regiones con temperaturas más altas, es decir, se produce un proceso de

adaptación a las circunstancias habituales de su medio físico (Alberdi *et al.*, 1998; Díaz *et al.*, 2002). Por ello los sistemas de alerta adoptado por los diversos gobiernos consideran umbrales de riesgo diferentes en función de las condiciones climáticas normales de la zona. Para hacer frente a esta situación, se han propuesto dos tipos de umbrales para establecer la escala de sensaciones a partir del índice PET:

umbral absoluto, basado en los valores en los que se produce el equilibrio térmico, según las pautas establecidas en los modelos experimentales y **umbral relativo**, que tiene en cuenta el factor de adaptación, en función de los valores típicos de cada época o región

climática, obtenidos a partir de los estadísticos de largas series climáticas.

El grupo 6 de la IBS fija la **escala absoluta** en 18°C y 23°C, como los límites del intervalo para el cual se obtiene la neutralidad térmica, de acuerdo con los resultados obtenidos por el modelo de simulación de Fiala: una PET de 18°C representa el umbral inferior de confort (*LCC, Lower Constant Comfort*), por debajo del cual comienzan a manifestarse sensaciones de frío; 23°C es el umbral superior o *UCC (Upper Constant Comfort)* e indica el valor a partir del cual comienzan a manifestarse sensaciones de malestar asociadas al calor (Cuadro IV).

Cuadro IV. Umbrales absolutos de la temperatura fisiológica, basado en el modelo de balance energético de Fiala.

PET (°C)	Sensación térmica	Nivel de estres
Sup. 41	Muy cálido (bochornosos)	Extremo
35 a 41	Caluroso (muy cálido)	Fuerte, intenso
29 a 35	Cálido (caluroso)	Moderado
23 a 29	Ligeramente cálido (cálido)	Ligero
18* a 23**	Confortable	Nulo
13 a 18	Ligeramente frío (suave)	Ligero
8 a 13	Fresco	Moderado
4 a 8	Frío	Fuerte, intenso
Inf. 4	Muy frío	Extremo

** Umbral superior del intervalo de confort (UCI, en sus siglas en inglés)

* Umbral inferior del intervalo de confort (LCI)

La escala relativa se construye modificando el umbral superior e inferior del intervalo de confort, mediante la siguiente expresión:

Umbral inferior = $18 + (PET_{\min} - 18) \cdot 0,33$

Umbral superior = $23 + (PET_{\max} - 23) \cdot 0,33$

PET_{mx} y PET_{min} son los valores obtenidos tras aplicar a los datos diarios,

obtenidos con los valores climáticos de la zona, un filtro que tiene en cuenta los valores de los 30 días anteriores. Se basa en el hecho de que los cambios que se producen en el organismo, a fin de aclimatarse a las fluctuaciones de corto plazo, tienen lugar en un intervalo de una o dos semanas, pero desaparecen en el intervalo de un mes.

Por su parte, 0,3 es un factor, que trata de incluir a la parte de la población que no se adapta completamente a los cambios y cuya contribución corresponde a un 1/3 del valor total del índice (Jendritzky et al., 2001, 2002).

4. Régimen bioclimático del área metropolitana de Madrid

El año bioclimático medio típico del área metropolitana de Madrid se ha obtenido a partir de la serie diaria del observatorio de Barajas en el periodo 1985-2004. El índice PET se ha calculado 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. Los cálculos se han realizado para dos supuestos: en el primero con una temperatura radiante igual a la temperatura del aire y el otro con la temperatura media radiante calculada por el modelo Rayman. Los límites de las diferentes sensaciones de confort se han obtenido a partir de la media de ambos valores.

1. Régimen bioclimático medio en el área metropolitana de Madrid. A partir de los datos diarios del periodo 1985-2004 se ha calculado el valor medio de los diferentes umbrales de confort que correspondería a cada uno de los 365 días del año (Fig. 4) y los valores medios mensuales (Cuadro V). Se representa, por tanto, el año bioclimático medio, típico del área madrileña, en el que los umbrales de confort varían a lo largo del año en función de las características del clima de la zona.

El análisis mensual nos muestra que en

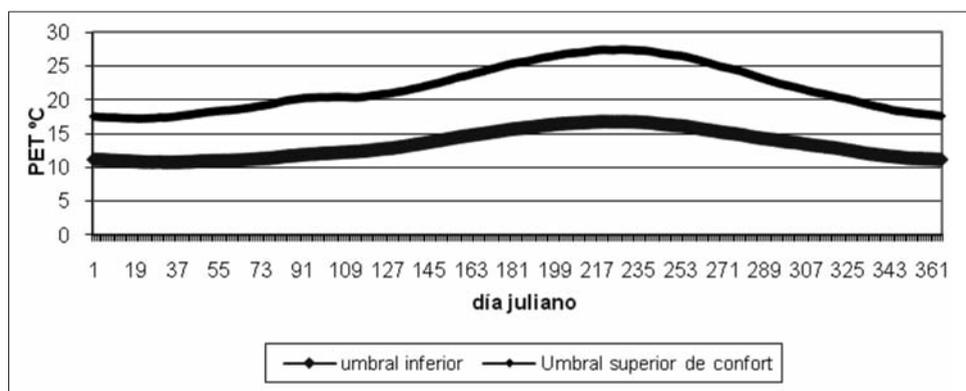


Fig. 4. Valores medios diarios de los umbrales de confort en Barajas (1985-2004).

enero las sensaciones de confort térmico se alcanzan con unos valores de la PET comprendidos entre los 11,6°C y 17,8°C, mientras que en agosto el intervalo de confortabilidad se sitúa entre los 17,1°C y

25,5°C. Del mismo modo, valores de la PET inferiores a -2,5°C en enero, indicarían situaciones extremadamente frías y en agosto valores superiores a 43,5°C situaciones de calor extremo.

Cuadro V. Umbrales de las diferentes sensaciones térmicas en función de los valores de la PET (°C)

mes	frío	fresco	Suave	UIC	USC	cálido	caluroso	muy cálido
En	-2,4	1,6	6,6	11,6	17,8	23,8	29,8	35,8
Fb	-2,6	1,4	6,4	11,4	18,1	24,1	30,1	36,1
Mr	-2,2	1,8	6,8	11,8	19,1	25,1	31,1	37,1
Ab	-1,3	2,7	7,7	12,7	19,8	25,8	31,8	37,8
My	-0,1	3,9	8,9	13,9	20,8	26,8	32,8	38,8
Jn	1,6	5,6	10,6	15,6	22,8	28,8	34,8	40,8
Jl	2,8	6,8	11,8	16,8	24,7	30,7	36,7	42,7
Ag	3,1	7,1	12,1	17,1	25,5	31,5	37,5	43,5
St	2,3	6,3	11,3	16,3	24,4	30,4	36,4	42,4
Oc	0,9	4,9	9,9	14,9	22,2	28,2	34,2	40,2
Nv	-0,5	3,5	8,5	13,5	20,2	26,2	32,2	38,2
Dc	-1,8	2,2	7,2	12,2	18,5	24,5	30,5	36,5

La frecuencia mensual de días clasificados de acuerdo con las diferentes sensaciones térmicas (fig. 5), muestra un claro contraste entre un verano corto, pero muy cálido y un invierno bastante más largo y frío. Junio, julio y agosto son los tres meses en los que las sensaciones cálidas y muy cálidas representan más del 50% de los días y los que tienen la máxima probabilidades de que se alcancen situaciones de máximo estrés térmico; otro rasgo característico del verano es la práctica desaparición de días confortables, compensado por un aumento de las noches con estas características, salvo un porcentaje muy débil de noches cálidas. Desde noviembre a marzo las sensaciones frías y muy frías alcanzan valores superiores al 40%, con un máximo en enero, mes en el que el 80% de los días tienen estas características. Abril y octubre, mayo y septiembre, presentan un ritmo bioclimático muy similar con un aumento de los días confortables o ligeramente cálidos, disminución de las noches frías y presencia

de algunos días cálidos y calurosos, más frecuentes en mayo y en septiembre; en estos dos meses, además, la duración del periodo del confort es bastante largo al aumentar las noches confortables.

2. Tendencias. En el área de Madrid sin influencia urbana, en el periodo de 20 años analizado (1985-2004), las sensaciones muy cálidas y muy frías constituyen un rasgo distintivo de nuestro clima. Tal y como se muestra en la figura 6, durante todos los años se registran estas situaciones en un número que varía entre 40 y 100, en las muy frías y 15 a 60 las muy cálidas; no aparece una tendencia clara y la simple visualización de ambos gráficos indican una cierta aleatoriedad.

No ocurre lo mismo con los días extremadamente cálidos, en los que (Fig. 7) se observa que hasta 1996 se distribuyen de forma más o menos aleatoria y con una frecuencia no muy elevada, de ahí su carácter excepcional; sin embargo los cuatro primeros años del siglo actual han registrado

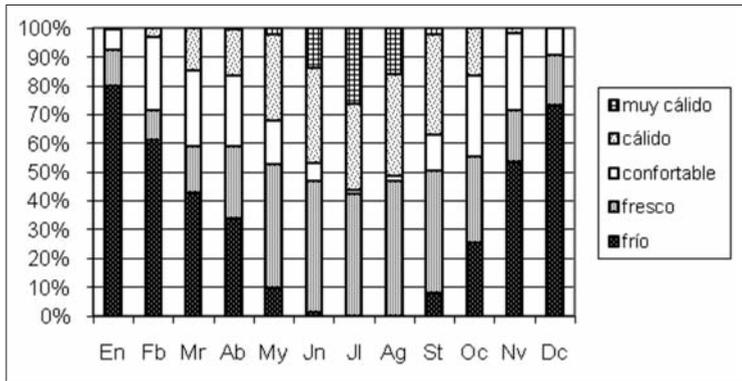


Fig. 5. Régimen bioclimático mensual.

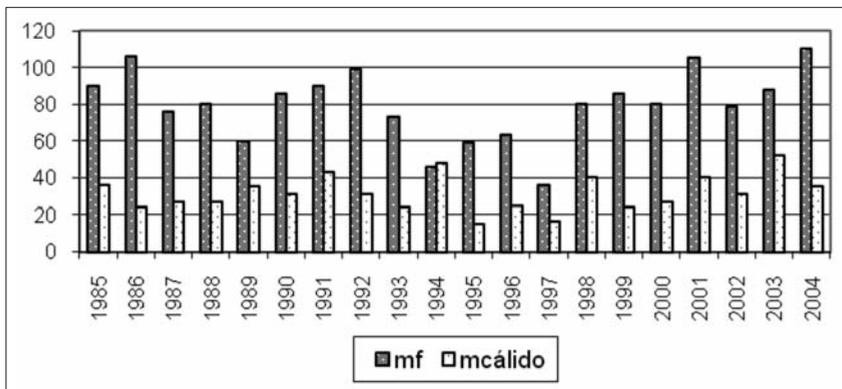


Fig. 6. Frecuencia de días muy fríos (azul) y muy cálidos (rojo) en Barajas durante el periodo 1985-2004.

todos ellos situaciones muy cálidas, con un máximo de nueve días en 2003, coincidiendo con la ya nombrada ola de calor de este año. Parece confirmarse, por tanto, la previsiones del IPCC de la mayor frecuencia de situaciones cálidas, que se están convirtiendo en habituales en el clima de nuestro entorno (Fernández y Rasilla, 2008). Se observa, también, un cambio de tendencia en los meses en los que se producen tales situaciones, de tal modo que hasta el año 2000 (Fig. 8) julio y agosto fueron los meses en los que estas situaciones alcanzaron mayor frecuencia, mientras que en junio únicamente se registró un día (en 1994); a

partir de 2000, comienzan a ser frecuentes también en junio, lo que sugiere que los días de calor excesivo, no sólo se han hecho más habituales, sino que además afectan a los tres meses estivales, reforzando el carácter estival de junio.

Además, a partir del año 2000 (Fig. 9) han aumentado el número de días muy cálidos en mayo, a la vez que disminuye su frecuencia en septiembre. Parece, por tanto, que se está produciendo un cambio de tendencia en el comienzo de la estación cálida: las situaciones típicas del verano comienzan su aparición en mayo y junio desbancan a septiembre como el tercer mes estival.

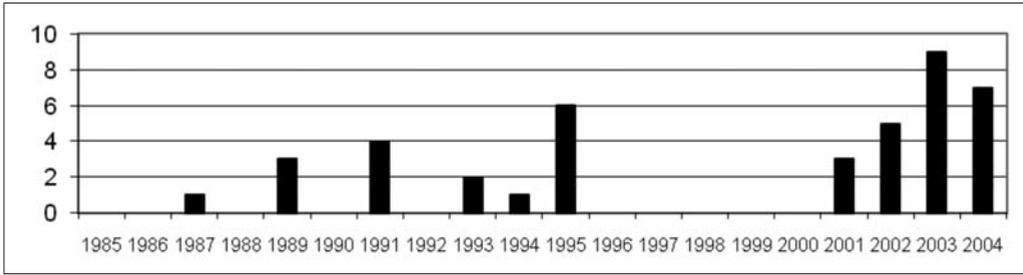


Fig. 7. Frecuencia de días extremadamente cálidos en Barajas durante el periodo 1985-2004.

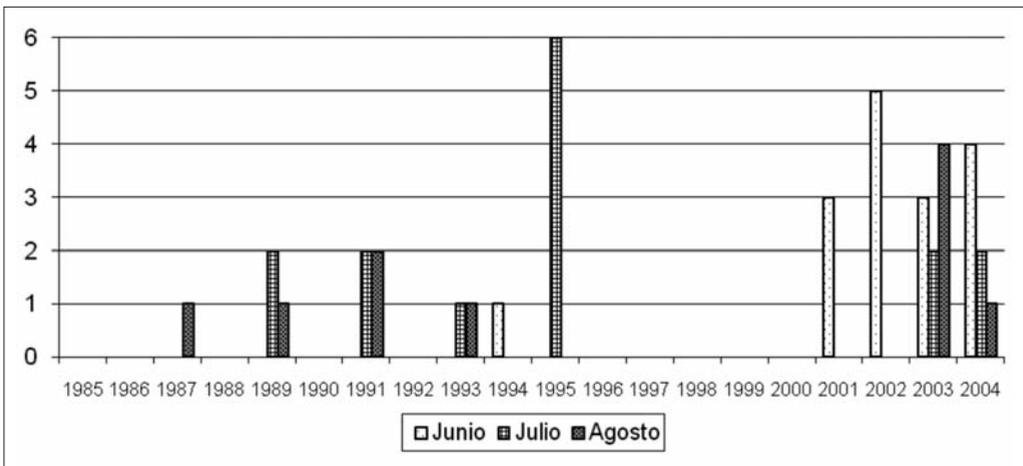


Fig. 8. Evolución interanual de del total de días extremadamente cálidos en los tres meses estivales.

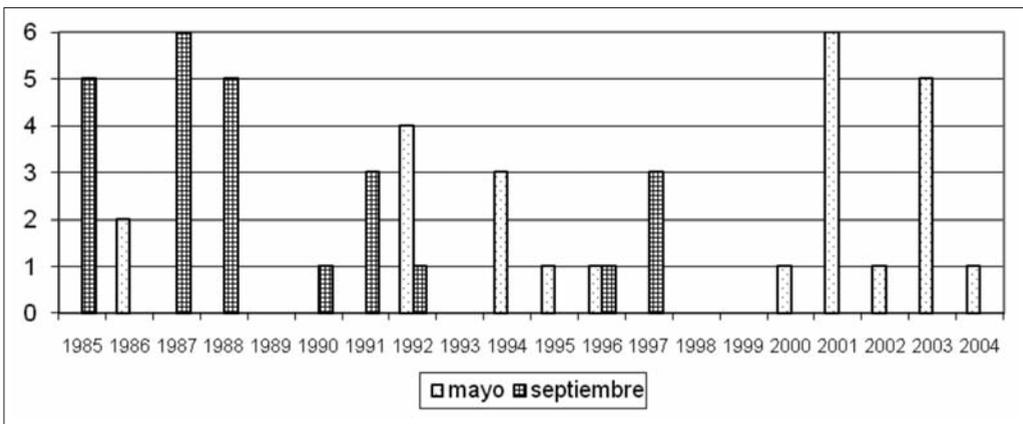


Fig. 9. Evolución interanual del total de días muy cálidos en mayo y septiembre.

Consideraciones finales

El estudio bioclimático del área de Madrid, que acabamos de realizar, trata de cubrir una laguna importante en el conocimiento del clima de nuestra zona, sigue una de las líneas de investigación de gran actualidad, como es la bioclimatología, y los resultados obtenidos son comparables a los de otras zonas de nuestro entorno, al utilizar una metodología similar.

El clima del área metropolitana madrileña se presenta en términos del estrés térmico al que se ven sometidos los habitantes de la zona: la temperatura fisiológica es la nueva variable que integra todas aquellas que contribuyen al confort térmico y el año bioclimático medio, que hemos definido, nos da una visión de las condiciones de confort o malestar que se suceden a lo largo del año.

A diferencia de otros índices, la escala de sensaciones se establece teniendo en cuenta el factor de adaptación a las condiciones climáticas del entorno, de tal manera que los umbrales varían a lo largo del año.

Las aplicaciones potenciales de este índice son muy variadas y entre ellas, destacamos: la caracterización de situaciones extremas, como olas de calor, que pueden provocar riesgos para la salud de las personas, tomando como referencia los valores diarios de la temperatura fisiológica; también, la estimación de los consumos energéticos, en calefacción o refrigeración, necesarios para mantener unas condiciones de confort aceptables y la definición del potencial climático-turístico de la zona.

Uno de los aspectos más interesantes del índice utilizado es la incorporación de la temperatura emitida por la superficie, lo que permite evaluar la incidencia de los diferentes usos del suelo y, por tanto, lo convierte en un excelente indicador de las transformaciones del clima regional derivadas de la urbanización.

Agradecimientos

Este trabajo se ha realizado en el marco del proyecto de investigación CGL2009-10057(subprograma CLI), financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación.

Bibliografía

ALBERDI, J.C. *et al.* (1998): «Daily mortality in Madrid community 1986-1992: relationship with meteorological variables». *Eur J. Epidemiol*, 14, pp. 571-578.

ÁLVAREZ, S. *et al.* (1992): *Control climático en espacios abiertos*, Madrid, U. de Sevilla, Junta de Andalucía - CIEMAT, 195 pp.

ANDRADE, H. y ALCOFORADO, M. J. (2008): «Microclimatic variation of thermal comfort in a district of Lisbon (Telheiras) at night». *Theoretical and Applied Climatology*, 92 (3-4), pp. 225-237.

ANDRADE, H. y LOPES, A. (1998): A utilização de um SIG para estimação das temperaturas em Lisboa, *Clima y ambiente urbano en ciudades Ibéricas e Ibero-Americanas* (Fernández García, Galán y Cañada, coord.), Parteluz, Madrid, pp. 85-91.

APHEIS (2002): *Health impact assesment of air pollution in 26 european cities. Air pollution and health: a european information system. Second year report 2000-2001*. Institut de Veille Sanitaire. Saint Maurice Cedex. 225 pp.

ARROYO ILERA, F. y FERNANDEZ GARCIA, F. (1991): *El confort térmico en Madrid*. Ediciones de la Universidad Autónoma. 112 pp.

BLAZEJCZYK, K. (1994): «New climatological and physiological model of the human heat balance outdoor (MENEX) and its applications in bioclimatological studies in different scales». En Blazejczyk y Krawczyk (ed.) *Bioclimatic reseach of the human heat balance*. Zeszyty IGIPZ PAN, 28, 2.

BLUESTEIN, M. y ZECHER, J. (1999): «A New Approach to an Accurate Wind Chill Factor». *Bulletin of Americ. Meteor. Soc.* n° 80, pp. 1893-1899.

BRAGER, G. y DE DEAR, R. (1998): «Thermal adaptation in the built environment: a literature review». *Energy and Buildings* n° 27, pp. 83-96.

BRUSE, M. (1999): *Simulating microscale climate interactions in complex terrain with a high-resolution numerical model: A case study for the Sydney CBD Area Model Description*. Bochum, Cologne, Department of Geography, University of Bochum, University of Cologne.

COPPE, C. *et al.* (2004): *Health and Global Environmental Change. Heat-waves: risks and responses*. World Health Organization, 80 pp.

DIAZ, J. *et al.* (2002): «Effects of extremely hot days on people older than 65 years in Seville (Spain) from 1986–1997». *International Journal of Biometeorology* n° 46, pp. 145-49.

EEA (2005): «Environment and health». En Aalst, R. (coord.) *European Environment Agency. Topic report 10/2005*, 40 pp.

FERNANDEZ GARCIA, F. (2001): «Clima y calidad ambiental en las ciudades: propuesta metodológica y aplicación al área de Madrid». En Raso, J. M y M. Vide, J. (eds.) *Proyectos y métodos actuales en Climatología*. Barcelona, Publicación de la Asociación Española de Climatología (AEC), Serie B, n° 1, pp. 41-66.

(2001): «Clima urbano y confort térmico en Madrid, España». *III Congresso Brasileiro de Biometeorologia*. Maringá, Brasil.

(2001-2002): «El clima urbano de Madrid y su influencia sobre el confort térmico». *Boletín de la Real Sociedad Geográfica*, CXXXVII-CXXXVIII, pp. 169-185.

(2003): «Fundamentos físicos y métodos de evaluación del confort climático

en los estudios de bioclimatología humana». En Martí Ezpeleta (ed.) *Publicaciones del Grupo de Climatología de la AGE*, Santiago de Compostela, ED. Universidad, pp. 135-170.

FERNANDEZ GARCIA, F. y MORENO JIMENEZ, A. (2004): «Confort climático y nivel de renta en la Comunidad de Madrid: un estudio exploratorio de su relación espacial». En *Historia, Clima y Paisaje. Estudios geográficos en memoria del profesor Antonio López Gómez*, Valencia, Ed. Universitat de Valencia, Universidad Autónoma de Madrid y Universitat de Alicante. pp. 305-321.

FERNANDEZ GARCIA, F. y RASILLA ÁLVAREZ, D. (2008): «Olas de calor e influencia urbana en Madrid y su área metropolitana». *Estudios Geográficos*, Volumen LXIX, n° 265, pp. 495-518.

FIALA, D., LOMAS, K. J. y STOHRER, M. (2001): «Computer prediction of human thermoregulatory and temperature responses to a wide range of environmental conditions». *International Journal of Biometeorology* n° 45, pp. 14-159.

FRIEDRICH, M., GRATZ, A. y JENDRITZKY, G. (2001): «Further development of the urban bioclimate model UBIKLIM, taking local wind systems into account». *Meteorol Z* n° 10, pp. 267-272.

GARCÍA, J.C y ALBERDI, J.C. (2004): «Impacto de la ola de calor del año 2003 en la mortalidad en el municipio de Madrid. Un análisis espacio temporal». *Geosanidad* n° 10.

GULYAS, A., UNGER, J. y MATZARAKIS, A. (2003): «Analysis of the thermophysiological significant conditions within a medium-sized city with continental climate (Szeged, Hungary)». *First International Conference on Urban climate*, Lodz, Poland.

HAUSER, PH. (1979): *Madrid bajo el punto de vista médico social*. Edición preparada por Carmen del Moral. Madrid, Editora Nacional, 2 vols.

- HOPPE, P. (1999): «The physiological equivalent temperature – a universal index for the biometeorological assessment of the thermal environment». *International Journal of Biometeorology* nº 43, pp. 71-75.
- (2002): «Different aspects of assessing indoor and outdoor thermal comfort», *Energy Building* nº 34, pp. 661-665.
- JENDRITZKY, G., MAAROUF, A. y STAIGER, H. (2001): «Looking for a Universal Thermal Climate Index UTCI for Outdoor Applications». *Windsor-Conference on Thermal Standards*, April 5-8, 2001, Windsor, UK. www.dwd.de/UTCI.
- JENDRITZKY, G. et al. (2002): «An Update on the Development of a Universal Thermal Climate Index». *15th Conf. Biomet. Aerobiol. and 16th ICB02*, 27 Oct – 1 Nov 2002, Kansas City, AMS, pp. 129-133
- MAAROUF, A. y BITZOS, M. (2000): *Windchill Indices. A Review of Science*. Meteorological Service of Canada.
- MATZARAKIS, A., RUTZ, F. y MAYER, H. (2002): «Validation of modelled radiant temperature within urban structures». *Fourth Symposium on the urban environment*, 20-24 May, Norfolk, Virginia, 7.3, pp. 72-73.
- MATZARAKIS, A. y RUTZ, F. (2005): *Visual manual RaymanPro*. Universidad de Freiburg, 58 pp.
- MAYER, H., MATZARAKIS, A. y IZIOMON, M. G. (2003): «Spatio-temporal variability of moisture conditions within the Urban Canopy Layer», *Theoretical and Applied Climatology* nº 76, pp. 165–79.
- PICKUP J. y DE DEAR R. J. (1999): «An Outdoor Thermal Comfort Index (Out-Set*), the Model and its Assumptions». En de Dear, R.J. y Potter J.C. (ed.): *Proceedings of the 15th International Congress of Biometeorology & International Conference on Urban Climatology*. Wesley Conference Centre, Sydney 08. - 12. Nov. 1999. Published by Macquarie University, Sydney, Australia, Nov. 1999.
- RASILLA ÁLVAREZ, D. y FERNANDEZ GARCIA, F. (2005): «Trends on extreme temperature days over the Iberian peninsula». *17th International Congress of Biometeorology. ICB 2005*. September 05-09, 2005. Gamisch-Partenkirchen (Germany).
- RASO, J.M. (2007): *El clima y la salud*. Barcelona, Davinci, col. Geoambiente XXI (Martín Vide, dir.). 233 pp.
- SOUCH, C. y GRIMMOND, C.S.B. (2006): «Applied climatology: urban climat». *Progress in Physical Geography* nº 30, 2, pp. 270–279.
- UNGER, J. (1999): «Comparisons of urban and rural bioclimatological conditions in the case of a Central European city». *Int. J. Biometeorology*, nº 43, pp. 139-144.
- WHO (2004): *Environmental health indicators for Europe. A pilot indicator based report*. World Health Organisation for European Region. 58 pp.