

RELACIÓN ENTRE LA ESTRUCTURA ESPACIAL DE LA ISLA TÉRMICA Y LA MORFOLOGÍA URBANA DE MADRID

Felipe FERNÁNDEZ*; Juan P. MONTÁVEZ**;

Jesús F. GONZÁLEZ-ROUCO*** y Francisco VALERO***

* *Departamento de Geografía, Universidad Autónoma de Madrid*

** *Departamento de Física, Universidad de Murcia*

*** *Departamento de Física de la Tierra, Universidad Complutense de Madrid*

RESUMEN

En este trabajo se presenta la relación existente entre la estructura térmica y morfológica de Madrid. A partir de más de 100 transectos agrupados en tres trayectos que cubren la mayor parte de la ciudad a diversas horas del día, se ha estudiado el comportamiento más común del campo de temperaturas mediante el análisis de Componentes Principales. Por otro lado se han creado una serie de índices a partir de los datos de densidad de edificaciones y parques. Los resultados muestran que la correlación entre las Funciones Empíricas Ortogonales y los índices y combinación de ellos es muy alta indicando que la estructura espacial de la Isla Térmica puede ser obtenida fácilmente a partir de datos morfológicos urbanos. Finalmente se presenta la estructura bidimensional de la ICU madrileña como función de los parámetros morfológicos.

Palabras clave: Isla térmica, PCA, índices de urbanización, SIG, Madrid.

ABSTRACT

In this work the relationship between the thermal structure and the morphology in Madrid is presented. The thermal structure has been obtained by using Principal Component analysis over more than 100 transects grouped in three different routes covering most of Madrid Metropolitan area at several hours. On the other hand, some indices have been created as a function of density of buildings and green areas. The high correlation found between the EOFs and the indices indicates that the spatial structure of Urban Heat Island can be easily obtained from morphological urban data. Finally the two-dimensional UHI is presented as a function of morphological parameters.

Key words: *Urban heat island, PCA, Urbanization indices, GIS, Madrid.*

1. INTRODUCCIÓN

La perturbación sufrida por el clima en las zonas donde se han desarrollado las ciudades es un tema que ha sido ampliamente estudiado (LANDSBERG, 1981; OKE, 1987). De todas las modificaciones climáticas provocadas por la presencia de la ciudad, la más notable y estudiada es la conocida como Isla Térmica (IT), que puede ser considerada como representativa de las diferencias de temperatura que se registran como consecuencia de la ciudad y las que hipotéticamente habría si no se hubiera producido urbanización alguna. Diversos estudios experimentales han demostrado que la intensidad del fenómeno depende, tanto de factores meteorológicos, como de la estructura y morfología urbana: es máxima durante la noche y en situaciones de cielos despejados y con vientos flojos y dentro de la ciudad se observan variaciones importantes en función de los usos de suelo, el tipo de urbanización y el trazado de la red viaria (ALMENDROS, 1992 y 1993; ALMENDROS y LÓPEZ GÓMEZ, 1995).

Desde el punto de vista experimental se han empleado métodos muy variados para caracterizar el fenómeno:

- Comparando registros de temperatura en estaciones urbanas y rurales (FIGUEROLA y MAZZEO, 1998; MONTÁVEZ *et al.*, 2000; etc.).
- Analizando series seculares de temperatura (KARACA *et al.*, 1995; etc.).
- Mediante el método de los recorridos (LÓPEZ GÓMEZ y FERNÁNDEZ, 1984; MORENO, 1994; MONTÁVEZ *et al.*, 2002).
- Mediante observaciones aéreas con imágenes térmicas desde satélites o aviones, etc. (LÓPEZ GÓMEZ *et al.*, 1993; FERNÁNDEZ GARCÍA *et al.*, 1996; ROTH *et al.*, 1992).

Los factores más importantes a los que comúnmente se le atribuye la causalidad de la IT son varios:

- La distinta inercia térmica de los materiales urbanos y rurales. Normalmente los primeros urbanos poseen una mayor inercia térmica lo que provoca un enfriamiento más lento.
- La estructura de la ciudad que hace que disminuya la pérdida de calor en el palio urbano por emisión en onda larga. Esta misma estructura también puede disminuir la pérdida de calor sensible por procesos advectivos y convectivos.
- La emisión de calor antrópico, normalmente asociado al transporte de calor del interior de las viviendas hacia el exterior, la emisión de vehículos y acondicionadores de aire, así como a diversos procesos de combustión.

El problema fundamental se plantea a la hora de establecer la importancia relativa de cada uno de dichos factores, para lo cual se hace necesaria la modelización del fenómeno. Dicha modelización se ha estudiado desde distintos puntos de vista (MONTÁVEZ, 2002):

- Mediante la aplicación de modelos teóricos, esencialmente modelos numéricos en los que se simulan los principales procesos de transferencia de calor (MONTÁVEZ, 2000b; JOHNSON *et al.*, 1991). Aunque también se pueden encontrar modelos a micro escala (OKE, 1981).
- Mediante la utilización de modelos empíricos. Algunos autores han relacionado la intensidad máxima de la IT con diversos factores como el número de habitantes, la extensión de la ciudad o con la ratio dado por la altura y anchura de las calles que componen la parte más cálida de la IT (OKE, 1973).

Recopilando los resultados de los trabajos anteriormente citados, se extrae como conclusión que los factores principales son la geometría (profundidad de los cañones urbanos) y la diferencia de inercia térmica de los materiales. El calor antrópico tiene cierta importancia pero está muy condicionado por la climatología de la zona, es decir depende de la estación de año y de la localización geográfica. Por otro lado cabe resaltar que dichos resultados están muy influenciados por el tamaño de la ciudad debido a procesos de microadvección y mezcla de las masas de aire rural y urbano.

Tomando como base dichos resultados, en este trabajo se plantea crear un modelo simple que sea capaz de reproducir la forma de la IT como una función de la morfología urbana. Para ello se investiga como primera aproximación la relación entre los perfiles de temperatura, obtenidos por el método de los transectos, y unos índices de urbanización que dan idea de la densidad de edificaciones y zonas verdes en la ciudad de Madrid.

2. ÁREA DE ESTUDIO Y BASES DE DATOS

Madrid está situada a 40°24'40'' de latitud norte (observatorio del Retiro) y a 3°40'41'' de longitud Oeste. Pertenece, por tanto, al dominio de los climas mediterráneos, cuyos rasgos más destacados son la estacionalidad de las temperaturas, la sequía estival y la irregularidad y escasez de las precipitaciones. La elevada altitud media, en torno a los 600 m, y su situación en el interior de la Península, alejada de las influencias del Mediterráneo y el Atlántico, le confieren un claro matiz de continentalidad con inviernos fríos y veranos muy calurosos. La media de enero es de 4,8°C y las mínimas se mantienen por debajo de los 0°C durante aproximadamente el 50% de los días invernales; el verano es más cálido, con una media de 25,2°C en julio y gran amplitud de 15,7°C (media de las máximas 31°C, y de las mínimas 17,3°C). La humedad relativa media es del 56%, con máximos en invierno, 70%, y mínimos en verano que se mantiene por debajo del 40%.

Las precipitaciones medias anuales oscilan en torno a los 450 mm, con un máximo principal en noviembre con 64 mm y otro secundario en abril con 54 mm; en enero y febrero se produce una relativa sequedad por la presencia de periodos anticiclónicos y en los meses centrales de verano raramente se superan los 10 mm. La escasa nubosidad y la alta insolación, en torno a 2.800 horas de sol al año, completan el cuadro climático de la zona.

Topográficamente la ciudad se asienta en una zona de lomas y vaguadas, al pie de la Sierra de Guadarrama con alturas máximas superiores a los 2.000 m. Esta topografía y la frecuencia de situaciones anticiclónicas favorecen la formación de brisas, con vientos catabáticos durante la noche que se acumulan en las zonas deprimidas y dan lugar a importantes inversiones térmicas.

En relación con su tamaño, la ciudad de Madrid constituye la mayor aglomeración urbana de la Península Ibérica, con una población cercana a los 3 millones de habitantes y rodeada de una serie de núcleos con poblaciones que oscilan entre los 70.000 y más de 150.000 habitantes. En conjunto nos encontramos con una aglomeración próxima a los 4.000.000 de personas en un radio inferior a los 30 km. Todo ello favorece la formación de una isla de calor muy acusada, con importantes matices dentro de la ciudad, relacionados con la morfología y estructura urbana, especialmente con la presencia de zonas verdes, como veremos más adelante.

Los estudios sobre el clima urbano de Madrid se remontan a 1984 (LÓPEZ y FERNÁNDEZ) y desde entonces se han realizado numerosos estudios, centrado fundamentalmente sobre la caracterización de la isla de calor. El trabajo que presentamos trata de complementar los ya realizados mediante la comparación de los datos obtenidos en los diferentes recorridos con parámetros urbanos, a fin de evaluar la influencia de la morfología y estructura urbana sobre el campo térmico de la ciudad.

Los datos que utilizamos corresponden a las temperaturas medidas en 170 puntos, con un termómetro digital de registro continuo situado sobre un vehículo. La campaña de medidas se realizó durante los años 1992 y 1993, a distintas horas del día y bajo variadas situaciones de tiempo y siguiendo tres itinerarios que cubren los diferentes ámbitos urbanos de Madrid (Fig. 1a). En la tabla 1 se presenta el número de trayectos realizados en cada itinerario y el número de puntos en el que se tomaron registros.

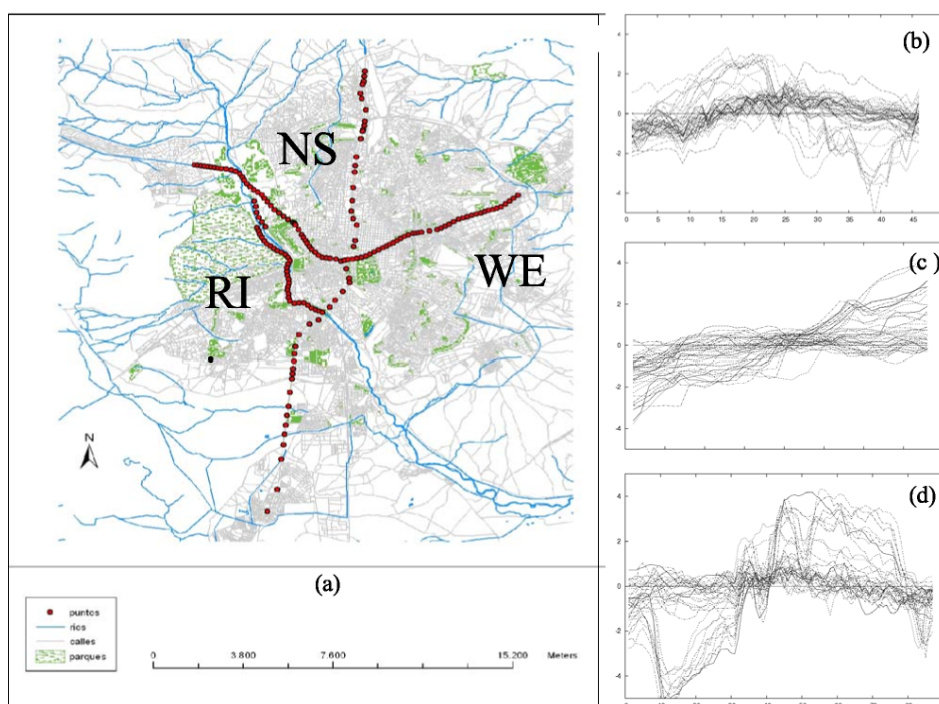


Fig. 1. (a) Morfología de Madrid. Los círculos indican los puntos que conforman los distintos itinerarios; (b) Perfiles de temperaturas registrados en el itinerario N-S; (c) RI y (d) SO-NE

El primero se inicia en Fuencarral, núcleo perteneciente a la periferia norte de la ciudad, y atraviesa Madrid finalizando en Getafe, núcleo de 120.000 habitantes, al sur de la ciudad. El recorrido sigue la dirección N-S y discurre en su mayor parte por zonas de edificación compacta y tráfico denso, con algunos espacios singulares que modifican la intensidad de la isla de calor, como el tramo Recoletos - Prado con denso arbolado en el centro y próximo al Jardín Botánico que atenúan la intensidad de la isla de calor. Otra zona de interés aparece más al sur, donde la vaguada del Manzanares señala otro mínimo al ser una vía de penetración de los vientos fríos del norte. Ya en campo abierto, la periferia sur aparece como la zona más fría, con mínimos en zonas deprimidas topográficamente. El final del recorrido marca un máximo secundario coincidiendo con el núcleo urbano de Getafe.

Tabla 1. Número de recorridos (N) y número de puntos donde se recogieron datos (NP) para cada itinerario

<i>Itinerario</i>	<i>N</i>	<i>NP</i>
N-S	41	46
SO-NE	32	88
RI	41	36

El segundo recorrido se inicia en las proximidades de Aravaca al NE de Madrid, en una zona próxima a la gran masa forestal de la Casa de Campo y el monte del Pardo. El primer tramo sigue una topografía descendente hasta la vaguada del Manzanares, atravesada en la zona denominada

Puerta de Hierro y sigue después por la ciudad Universitaria con edificios altos, pero aislados y abundantes espacios verdes. El contacto con la ciudad se inicia en el barrio de Argüelles, con un aumento importante de la temperatura. Dentro de la ciudad la mayor parte del recorrido sigue la dirección SO-NE, por la calle de Alcalá, y finaliza en el barrio de Canillas. Los puntos de interés para la isla de calor en este recorrido son: la Plaza de España, próxima a la Casa Campo y abierta al valle del Manzanares, y la Plaza de la Independencia, situada en las proximidades del Parque del Retiro, extensa masa forestal en el interior de la ciudad.

El tercer recorrido discurre por la ribera del Manzanares (RI), ocupada actualmente por una vía de circulación rápida, la M-30. Es una zona deprimida y principal vía de penetración de las masas frías procedentes del área serrana y de la gran masa forestal que representa la Casa de Campo. Tras un primer tramo en que dominan los espacios verdes, hacia el E penetra en una zona claramente urbanizada.

En conjunto, los tres recorridos descritos cubren las variadas tipologías urbanas que aparecen en Madrid y los datos registrados muestran la influencia de cada una de ellas en la configuración del campo térmico de la ciudad.

La morfología y estructura de las distintas zonas atravesadas por los recorridos se han determinado mediante la obtención de un índice de densidad de edificaciones y zonas verdes. La información básica procede de la cartografía digital elaborada por el Servicio Cartográfico Regional de la Comunidad de Madrid, sobre la base cartográfica del mapa 1/50.000. De las 17 hojas que componen la CAM, el área de estudio comprende las correspondientes a los números 7, 8, 12 y 13. La información original, en formato .DXF, ha sido convertida en formato .SHP para ser analizada con el Sistema de Información Geográfico ArcGis 8.2. Se han seleccionado las capas correspondientes a edificios y zonas verdes y hemos transformado los polígonos originales en puntos, que han sido organizados en dos mallas regulares de 10 x 10 m que cubre el área representada en la figura 1: la malla 1, representa la superficie ocupada por edificios (si en ese punto de rejilla hay edificio el valor es 1 y 0 en caso contrario); la malla 2, representa el área cubierta por zonas verdes (si en ese punto de rejilla hay una zona verde el valor es 1 y 0 en caso contrario). El índice de densidades se obtiene, como veremos más adelante, evaluando la densidad de cada uno de los parámetros mencionados con relación a cada punto del recorrido térmico.

3. METODOLOGÍA

La metodología seguida en este trabajo consta fundamentalmente de dos partes, por un lado la extracción de las anomalías de temperatura más representativas de cada itinerario y, por otro lado, la elaboración de distintos índices de urbanización. La combinación de ambos parámetros nos permitirá establecer qué índices o combinación de ellos caracterizan mejor los perfiles de temperatura.

3.1. Estructura térmica

Como se ha mencionado anteriormente, los recorridos realizados cubren un amplio espectro de situaciones tanto horarias como meteorológicas, en las que indudablemente la intensidad de la IT es muy diferente. En este trabajo nos preocupamos tan solo de las máximas y más representativas

variaciones que se pueden dar en la estructura térmica. Por ello el método empleado consiste en extraer de cada uno de los itinerarios la estructura que explique mayor varianza, con lo que se emplean el conocido método del análisis de Componentes Principales (ZWIERS y STORCH, 2000) utilizando la matriz de covarianza. Así pues se han realizado tres análisis diferentes para cada uno de los trayectos (NS, SO-NE y RI) empleando en el estudio las anomalías de temperatura en cada uno de los recorridos respecto a la temperatura media de cada uno de ellos.

Los resultados obtenidos se presentan en la tabla 2. Como puede observarse el porcentaje de varianza explicado por la primera EOF es superior al 57% en todos los casos, siendo en el caso de los trayectos RI y W-E cercana al 90%, y en todos los casos las dos primeras EOF explican siempre una varianza superior al 90%. Las EOFs obtenidas, que describen la estructura térmica de los itinerarios se representan en las figuras 2b, 2c y 2d.

Tabla 2. Varianza explicada de las principales EOFs obtenidas para cada itinerario. Correlación del patrón principal (EOF1) de cada itinerario y los índices óptimos

<i>Transect</i>	<i>EOF1</i>	<i>EOF2</i>	<i>U</i>	<i>P</i>	<i>I</i>
NS	57,16%	29,52%	0,76	-0,18	0,80
RI	87,94%	6,01%	0,93	-0,81	0,94
WE	87,90%	4,48%	0,84	-0,62	0,91

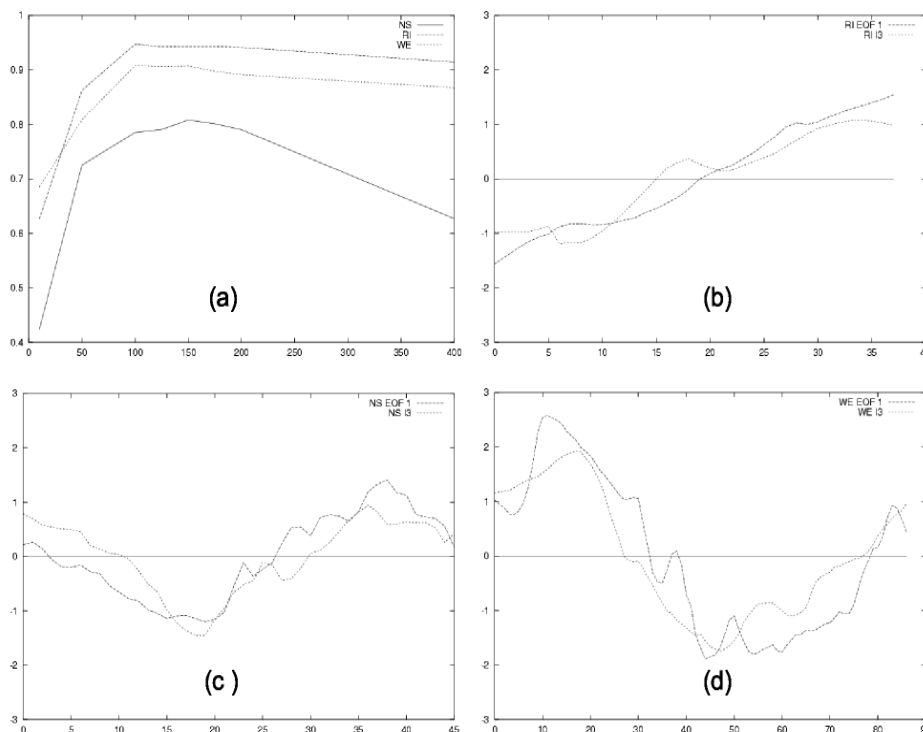


Fig. 2. (a) Índices de correlación entre la EOF 1 en función del radio de influencia. En (b) (c) y (d) se representan el índice I y la EOF 1 para los itinerarios RI, SO-NE y N-S respectivamente

3.2. Estructura urbana

La siguiente cuestión que se plantea es si existe una relación directa entre la estructura térmica de los trayectos y la densidad de edificios y zonas verdes de la ciudad. Para ello la hipótesis de la que partimos es que la temperatura del aire en un punto dado depende de la densidad de edificios que tiene a su alrededor y construimos el índice U de la siguiente forma:

- Se elige un radio de influencia R, de tal manera que para el cálculo del índice solo estarán involucrados los puntos que disten de dicho punto menos que R.
- El índice se construye como la suma de los valores ponderados con la distancia r al punto en cuestión. La función de ponderación aplicada es un decaimiento exponencial con la distancia.

La segunda hipótesis que se plantea es que la temperatura del aire dependerá también de las zonas verdes cercanas al punto en cuestión, con lo que el índice P se calculará de igual forma que en el caso anterior, pero en este caso las contribuciones a la temperatura serán negativas.

Por último, puesto que la temperatura en cada punto debería estar correlacionada con los dos índices anteriores (positiva con los edificios y negativa con las zonas verdes), creamos un nuevo índice que resulta de la combinación lineal de los dos anteriores, HI.

4. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

En el apartado anterior se ha mencionado que para el cálculo de un índice se utiliza un radio de influencia R. La cuestión a plantearse ahora es cuál es el radio de influencia óptimo. Para ello se han realizado índices para cada uno de los puntos de cada transecto, utilizando distintos radios de influencia y se han calculado las correlaciones entre los índices normalizados y la primera EOF de cada trayecto; como radio óptimo se ha seleccionado el que presenta la mejor correlación. En la figura 2a se representa la dependencia del índice de correlación con el radio de influencia escogido para los índices U y P. Se observa que para el caso de I, el máximo se encuentra en torno a las 100 unidades, lo que parece indicar que la temperatura en un punto se ve influenciada fundamentalmente por la morfología de las áreas localizadas en torno a 1 km de distancia.

En la tabla 2 se representan, para el caso de $R = 1$ km los coeficientes de correlación entre los perfiles de temperatura (EOFs) y los tres índices U, P y I. Como puede observarse las mejores correlaciones se obtienen para el índice I, con coeficientes de correlación en todos los casos bastante altos y superiores a 0,9 en los recorridos WE y RI. Para el índice U, de nuevo los coeficientes son bastante altos, superiores a 0,75 en todos los itinerarios, obteniéndose los peores resultados para el itinerario N-S, hecho que cabía esperar por la menor varianza explicada por su primera EOF. En cuanto a los índices P, son menores que los U, y de signo negativo, aunque bastante significativos para el caso de los recorridos NO-SE y RI.

A partir de los resultados obtenidos anteriormente, que caracterizan la relación entre la respuesta de la temperatura del aire y la morfología de la ciudad, construimos el mapa de isotermas de la IT, aplicando el modelo a diversos puntos de la malla en cuestión. El campo obtenido se representa en la figura 3. El patrón obtenido representa de manera bastante acertada la estructura usual de la IT

para el área metropolitana de Madrid descrita en trabajos anteriores (LÓPEZ GÓMEZ *et al.*, 1993; ALMENDROS, 2004).

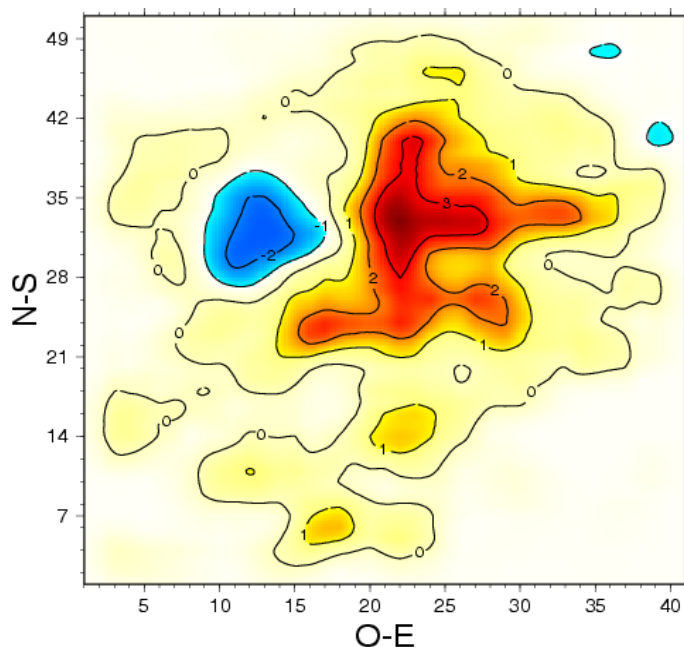


Fig. 3. Estructura térmica de la ciudad de Madrid a partir del índice I

5. COMENTARIOS Y CONCLUSIONES

En este trabajo se ha presentado la relación entre la estructura urbana y el perfil de temperaturas de tres trayectos en el área metropolitana de Madrid. Para extraer los perfiles térmicos del gran número de recorridos realizados se ha empleado funciones empíricas ortogonales. Los resultados presentan que el primer patrón identifica claramente las diferencias de temperatura entre los distintos puntos de cada uno de los trayectos, indicando que existe una estructura espacial de anomalías térmicas que domina en el caso de IT intensas.

Por otro lado se han construido tres índices: de densidad de edificación U, de densidad de zonas verdes P y un índice I, que resulta de la combinación lineal de los dos anteriores. Los resultados muestran una alta correlación entre dichos índices y la estructura térmica de la ciudad. Esto nos lleva a la conclusión de que la estructura espacial térmica asociada a la IT está íntimamente ligada a la morfología de la ciudad, y que a partir de bases de datos tan simples como las utilizadas en este trabajo se puede construir de manera bastante fiable la estructura espacial de la IT.

Como se ha mencionado en la sección introductoria las principales causas de la IT son la forma de los cañones urbanos, los materiales y el calor antrópico, además del tamaño de la ciudad. La pregunta que surge ante los resultados obtenidos, es cómo un índice tan simple puede dar tan buenos resultados. La hipótesis de la que partimos es que la densidad de edificaciones y zonas verdes representan, en cierta medida, la combinación de los factores anteriormente mencionados: los cañones más profundos se suelen localizar en las zonas con mayor densidad de edificación y donde la densidad de materiales puramente urbanos será mayor con lo que cabe esperar mayor

admitancia térmica; además, a mayor concentración de edificaciones habrá mayor cantidad de población y, por lo tanto, el calor antrópico será también mayor. Nótese además que la temperatura del aire, debido a mecanismos de mezcla tiende a ser un índice integrado de todos esos factores.

En principio el modelo aquí presentado no es capaz de dar un valor de la intensidad de la IT, tan solo un campo de anomalías de temperaturas normalizado. Para poder traducir este campo de anomalías estandarizadas a un campo real de diferencias de temperatura habría que conocer la diferencia real entre, al menos, un par de puntos de la malla. Diremos que como trabajos en desarrollo, se encuentra la predicción de la IT a partir de datos meteorológicos o salidas de modelos meso escalares. En los que sólo se calculará la intensidad real del campo, sino la deformación que pueda sufrir.

6. REFERENCIAS

- ALMENDROS, M.A. (1992). "Aspectos climáticos del Parque del Retiro (Madrid)". *Estudios Geográficos*, 207, pp. 217-240.
- ALMENDROS, M.A. (1993). "Aspectos climáticos sobre la Casa de Campo de Madrid". *Bol. de la Real Sociedad Geográfica*, CXXIX, pp. 27-46.
- ALMENDROS, M.A y LÓPEZ GÓMEZ, A. (1995). "La isla de calor en Madrid y las situaciones sinópticas". *Est. Geográficos*, 219, pp. 207-221.
- ALMENDROS, M.A (2004). "Modelización de la isla de calor en Madrid" En: *Historia, Clima y Paisaje. Estudios geográficos en memoria del profesor Antonio López Gómez*. Universitat de Valencia; Universidad Autónoma de Madrid y Universitat de Alicante, Valencia.
- FERNÁNDEZ GARCÍA, F.; ALMENDROS COCA, M.A y LÓPEZ GÓMEZ, A. (1996). "La influencia del relieve en la Isla de calor de Madrid: las vaguadas del manzanares y el Albroñigal". *Revista Estudios Geográficos*, 224, pp.473-494.
- FIGUEROLA, P. and MAZZEO, N. (1998). "Urban-rural temperature differences in Buenos Aires", *Int. J. Climatol.*, 18, pp. 1709-1723.
- JOHNSON, G.T. *et al.* (1991). "Simulation of Surface Urban Heat Island under 'Ideal' Conditions at Night. Part 1, Theory and Tests against Field Data". *Boundary-Layer Meteorol.*, 56, pp. 275-294
- KARACA, M.; TAYAÇ, M. and TOROS, H. (1995). "Effects of urbanization on climate of Istanbul and Ankara". *Atmos. Environ.*, 29, pp. 3411-3421.
- LANDSBERG, H.E. (1981). *The Urban Climate*. Academic Press, New York.
- LEE, H.Y. (1988). "An application of NOAA AVHRR thermal data to the study of the Urban Heat Island". *Atmos. Environ.*, 27B, pp. 1699-1720.
- LÓPEZ GÓMEZ, A. y FERNÁNDEZ GARCÍA, F. (1984). "La isla de calor en Madrid: avance de un estudio de clima urbano". *Estudios Geográficos*, 174, pp.5-34.
- LÓPEZ GÓMEZ, A. *et al.* (1993). *El clima de las ciudades españolas*. Cátedra, Madrid, 268 pp.
- LÓPEZ GÓMEZ, A.; FERNÁNDEZ GARCÍA, F. y MORENO JIMÉNEZ, A. (1993). *Clima urbano: teledetección de la isla de calor en Madrid*. MOPT, Madrid, 157 pp.
- LÓPEZ GÓMEZ, A. *et al.* (1998). *Temperaturas nocturnas y diurnas en Madrid a partir de teledetección aeroportada*. CSIC, Madrid, 83 pp.
- MONTÁVEZ, J.P.; RODRÍGUEZ, A.J. and JIMÉNEZ, J.I. (2000a). "A Study of the Urban Heat Island of Granada". *J. Climatol.*, 20, pp. 899-911.
- MONTÁVEZ, J.P.; JIMÉNEZ, J. y SARSA, A. (2000b). "A Monte Carlo model of the nocturnal surface temperatures in urban canyons". *Bound.-Layer Meteor.*, 96, pp. 433-452.
- MONTÁVEZ, J.P. (2002). *Variabilidad Climática y cambio Climático. Estudio Teórico y modelización de la Isla de Calor*. Tesis Doctoral., Universidad de Granada.

- MORENO, M.C. (1994). "Intensity and form of the Urban Heat Island in Barcelona". *I. J. Climatol.*, 14, pp. 705-710.
- OKE, T. (1973). "City size and the Urban Heat Island". *Atmos. Environ.*, 7, pp.769-779.
- OKE, T. (1981). "Canyon Geometry and the Nocturnal Urban Heat Island: Comparison of Scale Model and Field Observations". *J. Climatol.*, 1, pp. 237-254.
- OKE, T.R. (1987). *Boundary Layer Climates*. Routledge, London and New York.
- VON STORCH, H. and ZWIERS, F. (2000). *Statistical Analysis in Climate Research*. Cambridge University Press.