

LOS EFECTOS DE LA URBANIZACIÓN EN EL CLIMA DE ZARAGOZA (ESPAÑA): LA ISLA DE CALOR Y SUS FACTORES CONDICIONANTES

José M. Cuadrat Prats¹, Sergio M. Vicente-Serrano² y Miguel A. Saz Sánchez¹

¹ Departamento de Geografía. Universidad de Zaragoza

² Centre d'Etudes Spatiales de la Biosphère (CESBIO)

RESUMEN

En este trabajo se analiza la configuración de la isla de calor y su localización en la ciudad de Zaragoza (España), y se examinan los principales factores que influyen sobre la misma. Mediante recorridos urbanos se ha creado una base de datos térmicos, cuya integración en un Sistema de Información Geográfica ha permitido elaborar la cartografía de 27 días de medición. Con la aplicación de diferentes métodos estadísticos se ha analizado la relación entre las características espaciales de la isla de calor y los principales factores geográfico-urbanos de la ciudad, además de las variaciones de localización del máximo térmico en función de los vientos de superficie. Los resultados indican la importante influencia que para la constitución del fenómeno ejercen la topografía del terreno, la densidad de edificación, la cubierta vegetal y la reflectividad de los materiales de construcción, junto con los vientos dominantes del NW y SE.

Palabras clave: clima urbano, isla de calor, urbanización, Zaragoza, España.

ABSTRACT

This paper analyses the urban heat island in Zaragoza (Spain) and its spatial patterns. Moreover, the main structural and urban factors that affect this phenomenon are analysed. We created a data base of air temperature by means of urban transects. The data was used to

Fecha de recepción: Abril de 2005.

Fecha de admisión: Julio de 2005.

develop air temperature maps of 27 days. We analysed the relationships between the spatial patterns of the urban heat island, the main geographic-urban factors within the city and the role of surface winds on spatial variability of the urban heat island. The results indicate an important influence of topography, edification density, vegetation cover and reflectivity of materials to explain the spatial distribution of urban heat island. Moreover, the differences in the spatial patterns of the urban heat island are explained by dominant winds of NW and SE direction.

Key words: Urban climate, Urban heat island, Urbanisation, Zaragoza, Spain

1. INTRODUCCIÓN

Por la acción transformadora del espacio natural sobre el que se asienta, la ciudad llega a ser productora en gran medida de sus propias condiciones ambientales, incluidas las climáticas. Una de las principales alteraciones que causa la ciudad sobre el clima es el incremento de la temperatura del aire y el desarrollo de una isla de calor o térmica, que se concreta en la mayor temperatura del centro urbano en relación con el espacio rural circundante (Oke, 1990; Arnfield, 2003). Por lo general la isla de calor se incrementa en verano (Klysiak y Fortuniak, 1999; Morris *et al.*, 2001), y su intensidad resulta superior durante la noche (Unwin, 1980; Schmidlin, 1989; Jauregui, 1997) e incluso puede llegar a desaparecer durante el día (Unwin, 1980; Tapper, 1990; Steinecke, 1999).

Su forma e intensidad están determinadas por buen número de factores geográficos y estructurales: por ejemplo, los parques aparecen como zonas relativamente frías en comparación con las áreas construidas de su entorno (Oke, 1995; Moreno, 1994); de hecho, la cubierta vegetal afecta de modo evidente la distribución de las temperaturas (Dimoudi y Nikolopoulou, 2003; Upmanis y Chen, 1999). E igualmente relevante es la acción del relieve (Beral-Guyonnet, 1997), la geometría urbana (Elliason, 1994) o sobre todo el tamaño y población de la ciudad (Yamashita *et al.*, 1986; Hogan y Ferrick, 1988). Sin embargo, la configuración que adquiere la isla de calor no es estable y la variabilidad espacial y temporal pueden ser muy importantes, estando relacionados estos cambios con la dinámica atmosférica regional y determinadas condiciones meteorológicas, como han puesto de relieve Lowry (1977) y Landsberg (1981) al relacionar las diferentes formas de la isla de calor con los flujos de viento y las condiciones sinópticas.

La trascendencia económica y social que en la actualidad tiene el fenómeno urbano y su incidencia sobre el confort y la calidad de vida explican el lugar privilegiado que ocupa como tema de estudio y y la utilidad de su conocimiento para la gestión ambiental de la ciudad. En España se están realizando investigaciones de este fenómeno en buen número de ciudades, de las que han hecho una revisión general López-Gómez *et al.* (1993) y en Fernández *et al.* (1998). En Zaragoza, el estudio sistemático del clima urbano es muy reciente, se inicia en 1990 y se ha dirigido en esencia a estudiar la isla de calor y sus rasgos generales, como son la frecuencia e intensidad del fenómeno, su configuración espacial horizontal, la localización del máximo térmico y el análisis de sus variaciones temporales (Cuadrat *et al.*, 1993, 2003; Cuadrat, 1994; De la Riva *et al.*, 1997; López Martín, 1998 y 2002; Saz *et al.*, 2003;

Vicente-Serrano et al., 2003; Cuadrat, 2004); y se ha apoyado en la información suministrada por los observatorios meteorológicos fijos, los recorridos urbanos y las imágenes de satélite. En el presente trabajo se muestran los resultados de la investigación más reciente realizada en la ciudad de Zaragoza, cuyos objetivos han sido analizar la configuración espacial del fenómeno de la isla de calor, conocer su variabilidad espacial, y determinar los principales factores geográficos y estructurales que influyen sobre su creación, además de aquellos que explican las diferencias en sus patrones espaciales.

2. ÁREA DE ESTUDIO

Zaragoza es una importante ciudad industrial y comercial, de 620.000 habitantes, situada al Nordeste de España, en la zona central de la Depresión del Ebro, donde confluyen los cauces de los ríos Ebro, Gállego y Huerva que condicionan el tipo de materiales sobre los que se asienta: gravas y arenas, fundamentalmente (Figura 1). Su topografía no presenta grandes contrastes, siendo el punto más alto los Pinares de Venecia, a 280 m de altitud, al Sur de la capital, que se elevan unos 100 m sobre el eje del Ebro. La textura urbana es variada, pero no tiene edificios de gran altura, sólo unos pocos superan los 30 m. Por sus avenidas circulan a diario más de 30.000 vehículos, sobre todo en las más céntricas, lo que, asociado a la escasez de espacios verdes, contribuye a dar la imagen compacta que la ciudad posee.

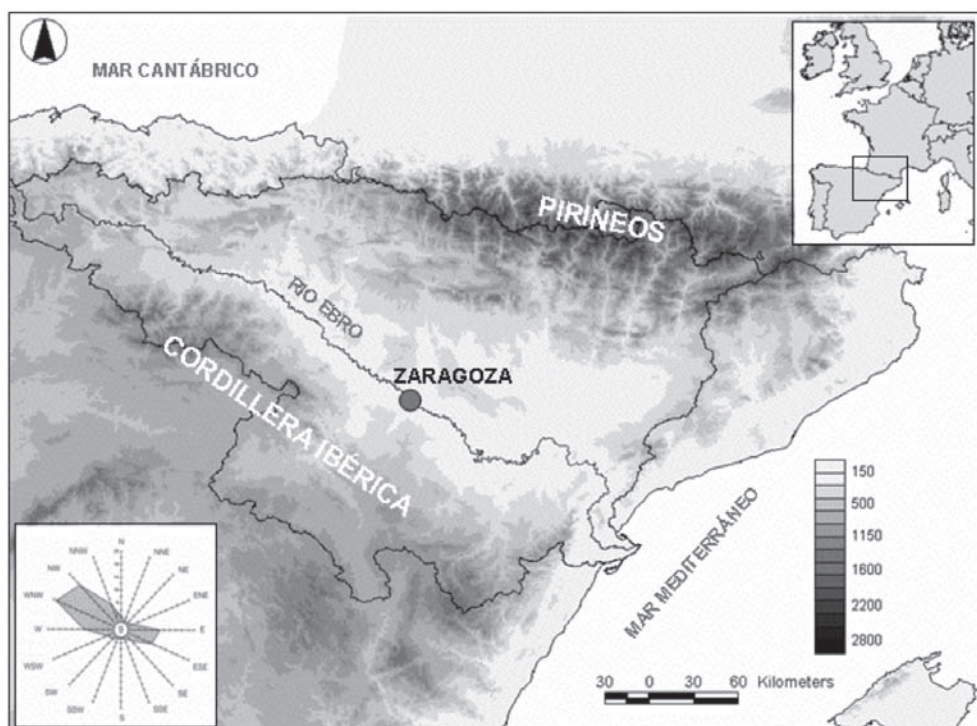


Figura 1. Mapa de localización de Zaragoza(España), altitudes (en m) y rosa de vientos de la ciudad

El clima es mediterráneo, con marcada influencia continental, caracterizado por la escasez de las precipitaciones (320 mm anuales) y el contraste entre un largo y frío invierno (6,2 °C es la temperatura media de enero) y un cálido y continuado verano (24,3 °C). El viento tiene gran significación por la frecuencia y por la intensidad que en ocasiones alcanza, superior algunas veces a 100 km/h, consecuencia de un claro efecto orográfico (Cuadrat, 1999): los diferentes flujos de aire de cualquier procedencia se canalizan en el corredor abierto entre el Pirineo al Norte y el Sistema Ibérico al Sur, y adquiere dos claras componentes, Noroeste y Sureste.

3. FUENTES Y METODOLOGÍA

3.1. Bases de datos

La fuente de información fundamental de este estudio son los datos de temperatura de la ciudad obtenidos entre junio de 2001 y septiembre de 2002 mediante recorridos o transectos urbanos realizados en tres automóviles equipados con sensores digitales de baja inercia y registro automático. Del total de mediciones, 27 fueron consideradas válidas; el resto se desecharon por diferentes razones: presencia de niebla, lluvia intensa, ausencia de isla de calor por fuerte viento, etc. Los recorridos se hicieron por la noche, por la mayor intensidad que en estos momentos alcanza la isla térmica (Cuadrat, 1994), y se iniciaron tres horas después de la puesta del sol. Se seleccionaron 238 puntos de medición distribuidos homogéneamente para cubrir la ciudad y su periferia, y para que fueran representativos de la diversidad de usos de suelo y densidades de construcción.

En cada medición se corrigieron los posibles errores y se eliminó la tendencia observada en todas las salidas por el progresivo enfriamiento nocturno; de esta forma se evita una falsa distribución espacial de las temperaturas y se pueden considerar como simultáneos los datos medidos (Winkler et al., 1981). Para ello se utilizó la ecuación de la recta de tendencia y el valor de los residuales de los valores térmicos respecto al tiempo (Montávez et al., 2000).

Para garantizar la comparación temporal entre los diferentes días de medición, se estandarizaron los datos utilizando la media y la desviación estándar de cada día de medición. De esta forma, todas las observaciones realizadas resultan equiparables, independientemente de los valores absolutos y la magnitud de las diferencias térmicas dentro de la ciudad.

Por lo que respecta a la información de los factores estructurales, a partir de los que se explica la distribución espacial de la isla de calor, su origen tiene varias procedencias: la estructura urbana se obtuvo a partir de una imagen Landsat-ETM+, de marzo de 2000, corregida geométrica (Palá y Pons, 1995) y radiométricamente (Pons y Solé, 1994) y mediante el uso de filtros texturales (Zhang, 1999). La misma imagen permitió determinar la reflectividad diferencial de los materiales y la cartografía de la cubierta vegetal de Zaragoza, mediante el cálculo del Índice de Vegetación Normalizado (NDVI) como método más idóneo por la buena relación que presenta con el índice de área foliar, la biomasa vegetal y la actividad fotosintética (Tucker 1979; Tucker *et al* 1981; Wylie *et al.* 2002). Dado que el detalle que se consigue con la imagen es muy alto, se realizó un filtrado de las imágenes de reflectividad y del NDVI final mediante un filtro de paso bajo (21 x 21 píxeles) para retener exclusivamente los patrones generales de distribución de la vegetación.

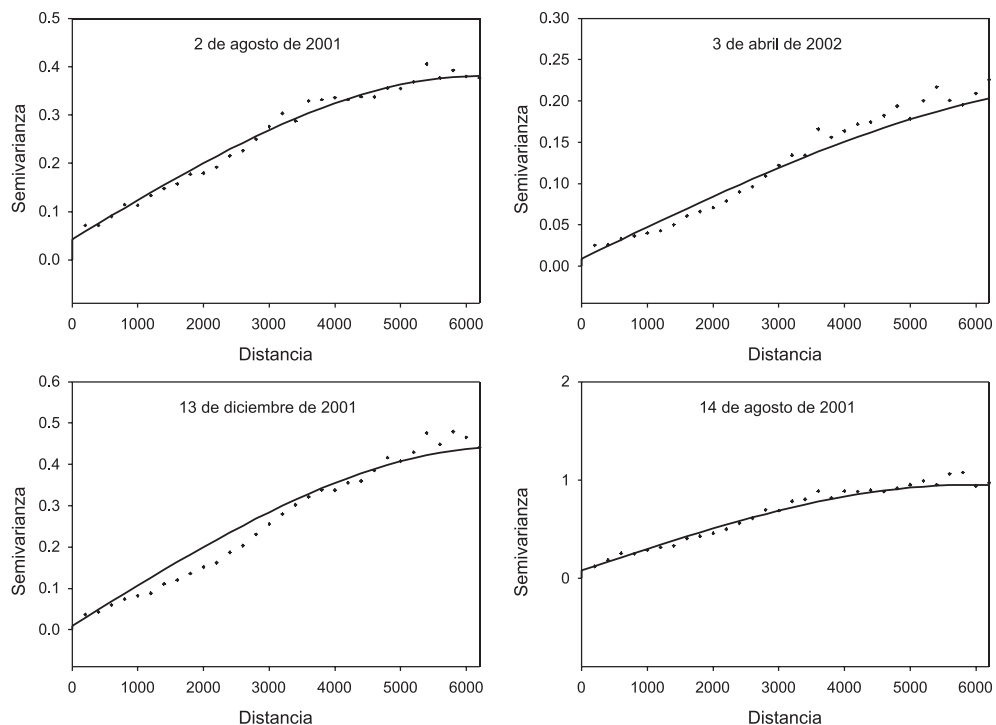


Figura 2. Semivariogramas de la temperatura de Zaragoza en cuatro momentos de medición

Para integrar la variable altitud se generó un Modelo General de Elevaciones a partir de la información digital a escala 1:25.000 del Instituto Geográfico Nacional correspondiente al término municipal de Zaragoza, usando el módulo ISOMODE del Sistema de Información Geográfica MiraMon. El resultado fue una retícula de 30 m de tamaño que coinciden con las cartografías climáticas desarrolladas y con la resolución espacial de la imagen de satélite. Otros datos de la ciudad, como el tráfico, fueron suministrados por el Ayuntamiento de Zaragoza e interpolados a la misma resolución espacial del resto de la información. La figura 2 muestra la distribución espacial de algunos de los factores estructurales y geográficos obtenidos en la ciudad de Zaragoza a un tamaño de celda de 30 metros.

3.2. Metodología

La información térmica estandarizada se integró en un Sistema de Información Geográfica (SIG) *ArcView GIS 3.2*. Un primer paso fue la interpolación de los datos para convertir la información puntual disponible en información continua, más ajustada a la realidad y comparable con otros rasgos territoriales. Se utilizó *kriging ordinario*, porque realiza una predicción muy válida de la variación espacial de los datos (Borough y McDonnell, 1998).

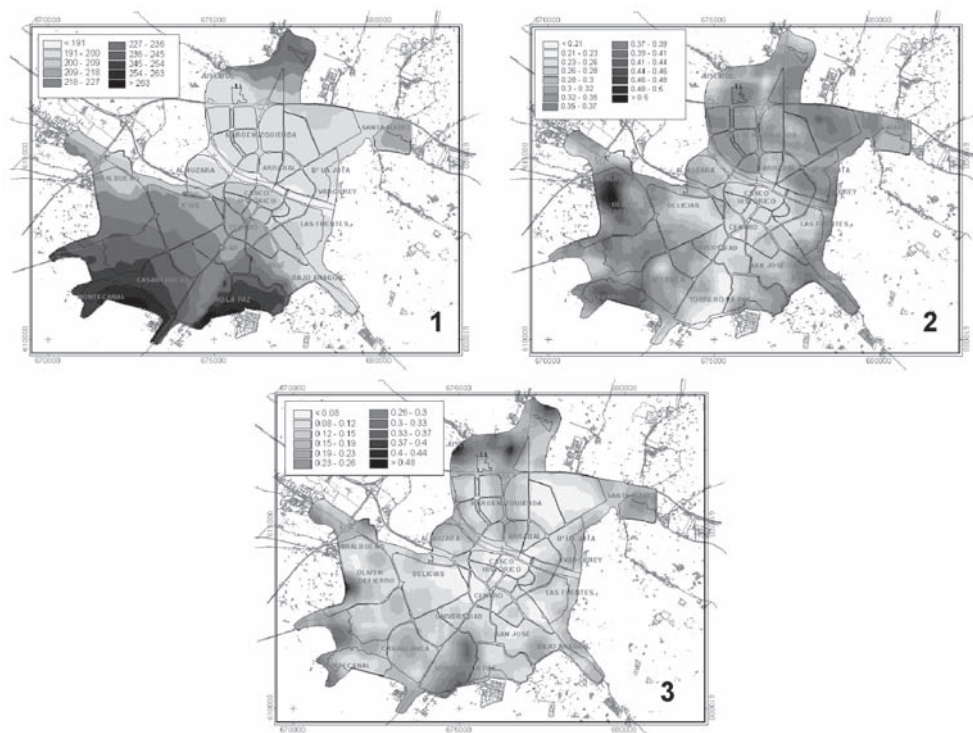


Figura 3. Ejemplo de distribución espacial de algunas de las variables geográficas utilizadas en el estudio de los factores que inciden en la distribución de la isla de calor: 1. Elevación, 2. Cubierta vegetal (NDVI con un filtro de ventana 21 píxeles), 3. Reflectividad de los materiales (espectro visible) (filtro de ventana 21 píxeles).

Inicialmente se determinaron una serie de funciones que relacionan la varianza espacial de las temperaturas entre los puntos de observación. Las funciones se obtienen mediante un semivariograma que ajusta las semivarianzas de los valores térmicos a diferentes distancias espaciales. Por lo general, es difícil encontrar buenos ajustes de los semivariogramas empíricos cuando se trata de interpolar variables de carácter climático, ya que las diferencias espaciales entre espacios cortos suelen ser grandes debido a la complejidad geográfica del medio; sin embargo, en este caso se consiguen buenos ajustes porque las temperaturas presentan una organización concéntrica en torno a un solo centro, con distribución radial de las distancias, que supone una mayor diferencia en los valores de la variable cuanto mayor sea la separación entre los puntos de medición. A modo de ejemplo, en la figura 3 se muestran los semivariogramas ajustados a los valores de temperatura de cuatro de los momentos de medición, y en los que se aprecia el incremento de la varianza conforme aumenta la distancia entre los pares de puntos, lo que permite ajustar en todos los casos un semivariograma esférico. La aplicación del kriging permitió obtener cartografías digitales a la misma resolución espacial que el

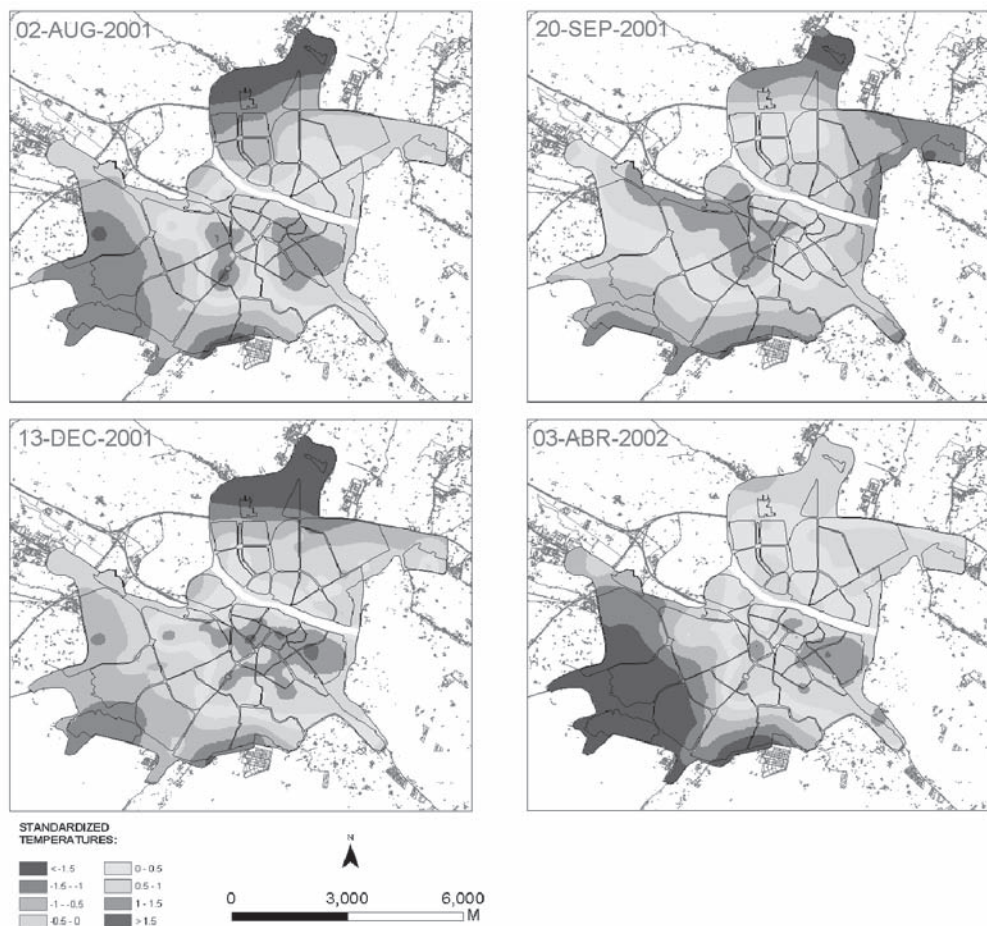


Figura 4. Ejemplo de distribución espacial de la isla de calor (temperaturas estandarizadas) en diferentes días de medición.

resto de variables geográficas y estructurales de la ciudad a la resolución de 30 metros. En la figura 4 se muestran los ejemplos de algunos días de medición en los que se comprueba la existencia de una marcada isla de calor en la ciudad.

Con la información estandarizada y espacialmente continua de los 27 días de medición se analizaron las características espaciales de la isla de calor de Zaragoza. Con este propósito se realizó un Análisis de Componentes Principales (ACP) en modo T, donde cada uno de los días de medición constituyeron las variables a resumir y las diferentes localizaciones (los 53.000 registros de las celdas del *grid*) los casos. La selección del número de componentes se realizó según el criterio de autovalor > 1 (Hair et al. 1998), y una vez obtenidos se consideró necesario su rotación, ya que tiene el efecto de redistribuir la varianza y eliminar ambigü-

dades espaciales. En el trabajo se optó por la rotación Varimax (Kaiser, 1958), por ser la más utilizada para conseguir patrones más estables y físicamente explicables (Richman, 1986). El ACP permite también obtener una matriz de cargas factoriales al correlacionar cada mapa individual con cada uno de los componentes extraídos, de tal modo que se puede determinar el peso que tiene cada uno de los días en cada componente. Esta matriz es la que se utilizó para conocer la importancia de la dirección del viento en la distribución espacial de la isla de calor.

4. RESULTADOS

4.1. La organización espacial de las temperaturas

La cartografía estandarizada de cada uno de los días de medida posibilita la comparación entre los diferentes mapas al convertir los valores absolutos en desviaciones estándar respecto de la media, y permite obtener un mapa promedio de la configuración de la isla de calor en Zaragoza en el que también se incluyen las áreas exteriores a la ciudad (Figura 5). Los rasgos más significativos del mismo son los notables contrastes de temperatura dentro

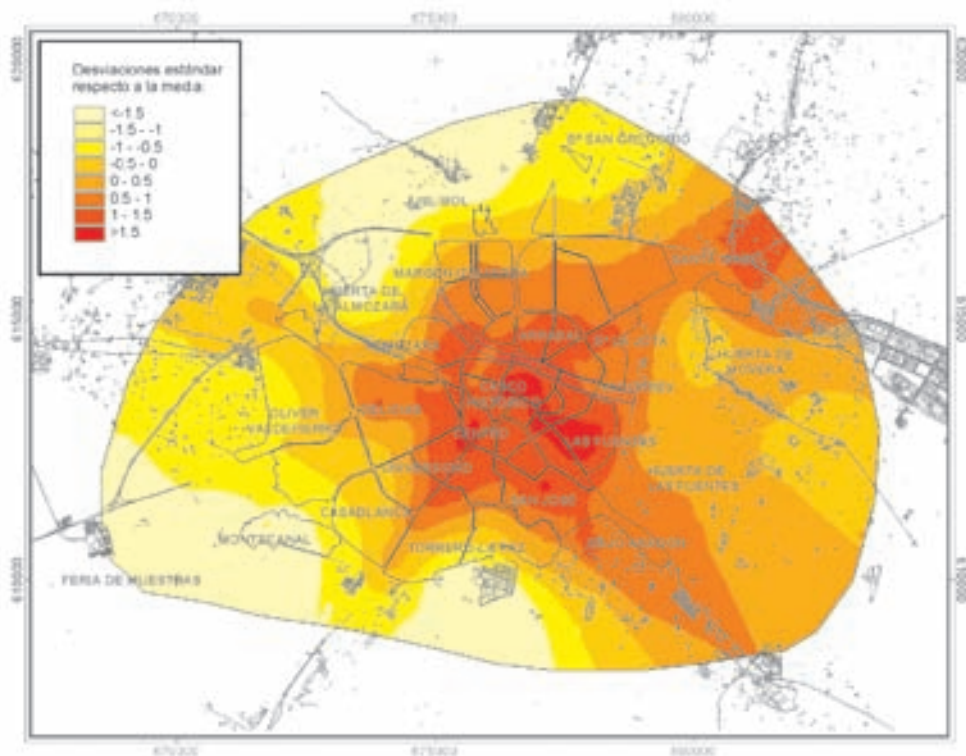


Figura 5. Mapa térmico promedio de Zaragoza

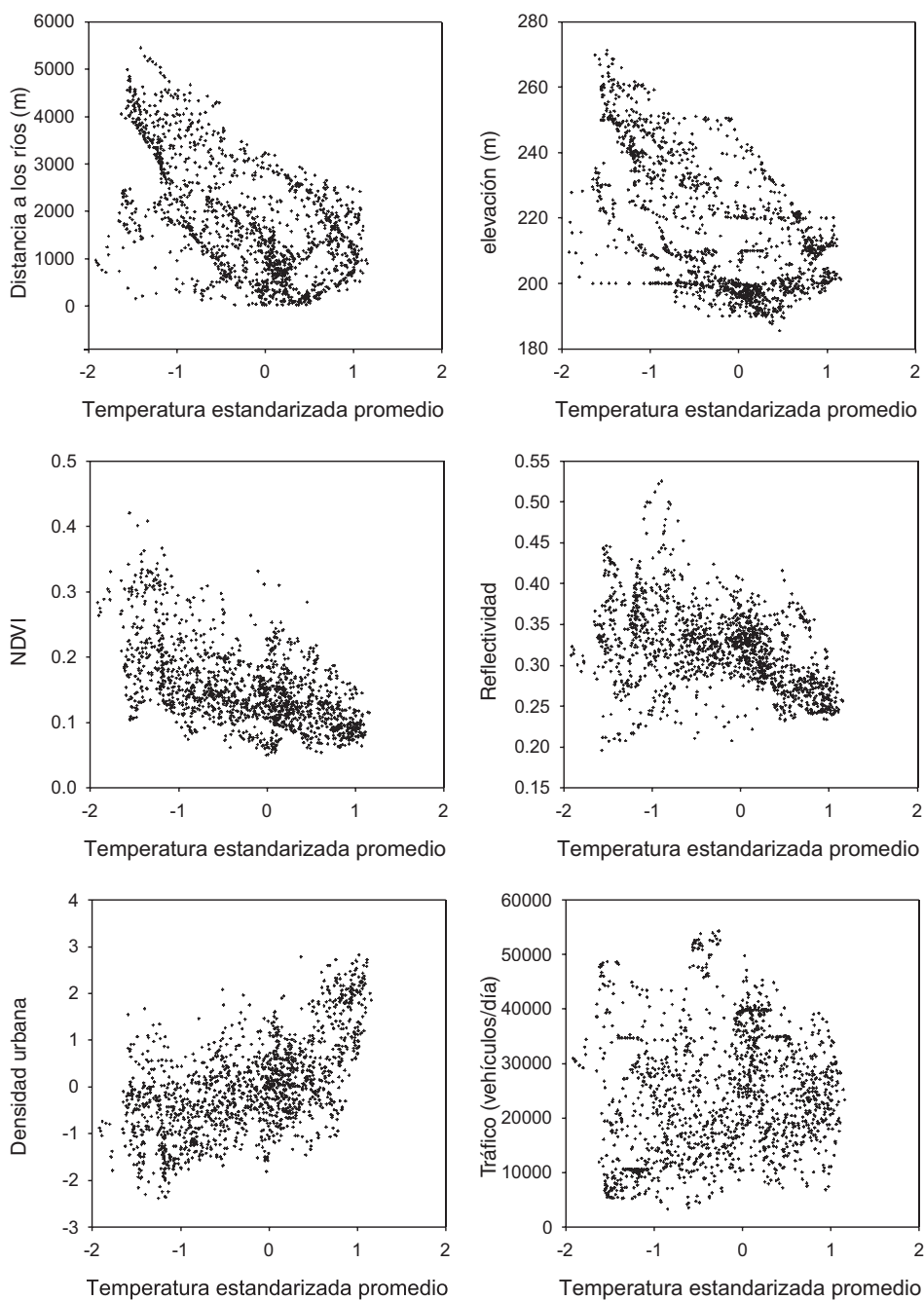


Figura 6. Relación entre las temperaturas estandarizadas y los diferentes factores geográfico-urbanos evaluados.

de la urbe. Respecto a su configuración, la isla térmica zaragozana suele presentar en gran número de ocasiones forma concéntrica, es decir, con isotermas nucleares cerradas y formas no muy alejadas de las circulares.

Los valores máximos se localizan predominantemente en la zona centro, en la margen derecha del río Ebro, y disminuyen de modo progresivo hacia la periferia circundante de Zaragoza dibujando claramente las superficies edificadas, con descenso más rápido hacia el Suroeste, Sur y Norte de la ciudad. En la periferia urbana se aprecia, además, una importante disimetría entre la zona oriental, más cálida, y la occidental, en general más fresca, claramente reflejada en la cartografía.

4.2. Factores condicionantes del clima urbano de Zaragoza

4.2.1. Factores geográfico-urbanos

La organización espacial descrita de las temperaturas de Zaragoza es consecuencia de la transformación del medio natural que el hombre ha hecho en la ciudad. La sustitución de la cubierta vegetal por un substrato impermeable, la masa compacta de edificios, la estructura urbana, el tráfico, etc., son evidencias claras de esta acción. A la magnitud de estos factores, que denominamos urbanos, se añaden los de naturaleza geográfica, como son la localización de la ciudad, su topografía, característica del entorno, presencia de arterias fluviales, etc.

Todos ellos contribuyen a modificar el clima de la ciudad, aunque no todos lo hacen del mismo modo, ni guardan el mismo grado de relación con las temperaturas. De manera gráfica queda reflejada en la Figura 6, donde se expresan con diagramas de dispersión la relación entre la distribución espacial promedio de la temperatura del aire dentro de la ciudad y sus factores condicionantes más influyentes. Parece clara la correspondencia que existe entre el mapa térmico y la elevación, la cubierta vegetal, la densidad de edificación o la distancia a los ríos; aunque no siempre esta relación es lineal: por ejemplo, la temperatura disminuye de forma suave con la altitud hasta aproximadamente los 230 m, pero a partir de esa cifra el descenso es bastante más rápido; y en el caso de la vegetación también van muy unidos espacios verdes y condiciones más frescas, pero no siempre un mayor índice de vegetación supone un descenso más pronunciado de la temperatura.

Para precisar la importancia de estos factores sobre la isla de calor se ha realizado un análisis de regresión múltiple por pasos (Hair et al., 1998), donde los factores considerados se han incorporado al modelo matemático de acuerdo con la correlación que presentan con la distribución espacial de la temperatura del aire. El resultado confirma que la topografía es una de las variables de mayor peso, por sí sola explica el 38 % de la varianza espacial de la temperatura del aire (Tabla 1); añadiendo la densidad urbana, se explica hasta el 62 %; y el modelo final, que incorpora además el NDVI y la reflectividad de los materiales, explica el 75 %. Otros factores no se han incorporado al modelo; así ocurre con el tráfico urbano, la densidad de población o la distancia a los ríos, muy relacionados con otros factores.

Tabla 1
RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE REGRESIÓN MÚLTIPLE ENTRE LAS TEMPERATURAS Y DIFERENTES FACTORES GEOGRÁFICO-URBANOS

| Modelo | R Múltiple | R ² Múltiple | R ² Ajustado | Error St. | Cambio en R ² |
|--------|------------|-------------------------|-------------------------|-----------|--------------------------|
| 1 | 0.62 | 0.38 | 0.38 | 0.60 | 0.38 |
| 2 | 0.79 | 0.62 | 0.62 | 0.47 | 0.24 |
| 3 | 0.82 | 0.67 | 0.67 | 0.43 | 0.05 |
| 4 | 0.86 | 0.75 | 0.75 | 0.38 | 0.07 |

Modelo 1 Predictores: Elevación

Modelo 2 Predictores: Elevación, densidad urbana

Modelo 3 Predictores: Elevación, densidad urbana, NDVI

Modelo 4 Predictores: Elevación, densidad urbana, NDVI, reflectividad

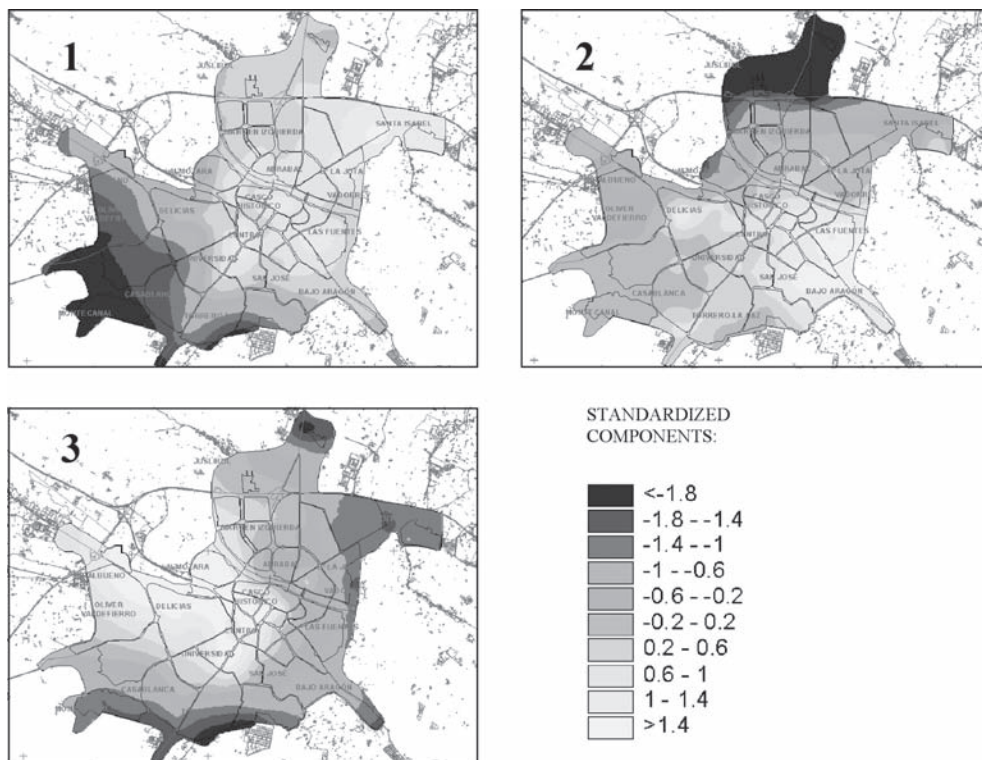


Figura 7. Componentes estandarizados obtenidos a partir de las series de mapa térmicos

4.2.2. Factores atmosféricos: el viento

Una vez examinados los factores estructurales que determinan la distribución media de la temperatura del aire en Zaragoza, también se estudió si dicha isla de calor es o no estable en el tiempo en cuanto a su configuración espacial, y en el caso de existir marcadas diferencias espaciales determinar qué factores pueden condicionar dicha variabilidad espacial. El factor más cambiante que dentro de la ciudad puede afectar a las variaciones en la isla de calor es la intensidad y la dirección de los flujos de viento (Gedzelman et al. 2003; Szegedy y Kircsi 2003). Por ello se examinó su papel en la ciudad de Zaragoza. Para ello se combinaron dos técnicas de análisis multivariante: un análisis de componentes principales (ACP) y un análisis de varianza.

La información extraída del ACP aplicado al conjunto de los 27 mapas estandarizados indica que el 92,9 % del porcentaje total de la varianza es explicado por tres componentes espaciales en la configuración de la isla de calor, del siguiente modo: el componente 1 (C1) explica el 40,5 %, el componente 2 (C2) el 37,2 % y el componente 3 (C3) el 15,1 %. Otros componentes obtenidos del análisis no han sido considerados por su escasa significación. La cartografía de los componentes estandarizados indica que el modelo espacial de la isla de calor no es estable, por el contrario, presenta tres formas diferentes (Figura 7). En el caso del C1 la configuración de la isla es muy similar al mapa térmico promedio de la ciudad: un máximo térmico localizado en las áreas centrales de Zaragoza y progresiva disminución de los valores hacia la periferia. El C2 muestra, en cambio, un evidente desplazamiento de las temperaturas hacia el Este. La diferencia con los barrios occidentales se hace patente, y de manera especial con los sectores más externos de la urbe, donde se experimenta un marcado descenso térmico. La situación es muy diferente en el C3: en este caso, la isla térmica se desplaza en dirección hacia el Oeste.

Estas significativas diferencias en la localización de la isla de calor se corresponden con las principales direcciones del viento, como muestra el análisis de varianza realizado para cada uno de los componentes. Las variables dependientes en los distintos casos (C1, C2 y C3) son las series de cargas factoriales diarias correspondientes a cada componente y el factor de agrupación son las dos direcciones dominantes del viento, NW y SE. Puesto que las cargas factoriales nos indican el peso de cada medición particular sobre un modelo espa-

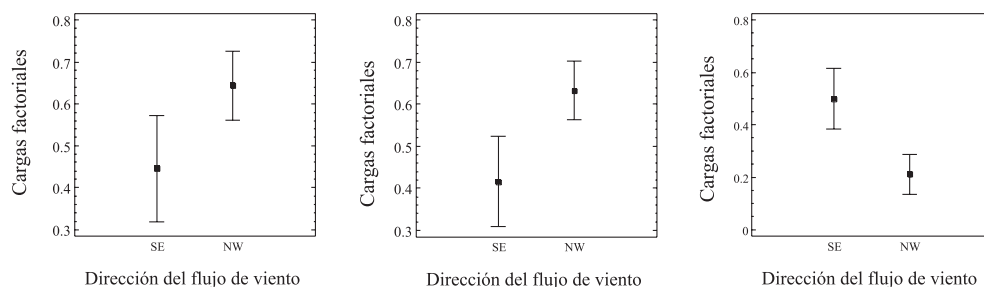


Figura 8. Valores de las cargas factoriales en función de la dirección del flujo de viento

cial establecido, cargas factoriales muy altas en situaciones de dominio de una determinada dirección del viento indican la influencia decisiva de la misma sobre el modelo representado. El componente 1 no muestra diferencias estadísticas significativas entre grupos, es decir, que en este tipo de configuración de la isla de calor no influye la dirección de los vientos de Zaragoza; en cambio, los componentes 2 y 3 indican la existencia de una clara relación con la dirección del viento, ya sea del NW o del SE.

Las diferencias de medias representadas en la figura 8, permiten ver que para la configuración espacial indicada por el C2, las situaciones de vientos del noroeste son las que ofrecen unas cargas factoriales más elevadas y significativamente distintas de las cargas factoriales medias de los días con vientos del sureste, indicándonos así la influencia directa del viento del NW sobre el movimiento de la isla térmica hacia el sector centro-oriental de la ciudad. Para C3 las temperaturas más cálidas se desplazan hacia el noroeste en correspondencia con el dominio de los vientos del SE sobre la ciudad.

4. CONCLUSIONES

El clima de las ciudades presenta muchos rasgos comunes, pero también son notables las diferencias entre ellas en función de los diversos factores geográfico-urbanos y meteorológicos que en cada una intervienen. En el estudio de la isla de calor de la ciudad de Zaragoza se observa que el efecto urbano ocasiona una notable modificación del clima, que contrasta significativamente con el del entorno periurbano o rural circundante. A su vez, la configuración local del relieve, la estructura urbana y la diversidad de usos de suelo crean importantes cambios internos que se traducen en la formación de espacios climáticos bien diferenciados.

La topografía es el factor más influyente en el reparto de las temperaturas, con un efecto negativo sobre las mismas. Zonas como las terrazas superiores del Ebro, 100 metros más altas que las zonas próximas a la ribera del río, son siempre más frescas, sobre todo en verano. La influencia de la topografía sin duda va unida en Zaragoza a la distancia a los ríos principales, Ebro y Gállego, pues la altitud aumenta conforme nos alejamos del río. Lo mismo ocurre en las áreas de parques y jardines. La evaluación realizada con el índice de vegetación obtenido a partir de imágenes de satélite muestra que entre las diferentes superficies verdes de la ciudad hay diferencias claras, pero en todas ellas las temperaturas suelen ser más bajas que en las áreas edificadas. La estructura urbana tiene también un peso notable sobre el mapa térmico, en este caso de signo positivo, siendo general que aquellas zonas de mayor densidad urbana (zona centro, por ejemplo) registren temperaturas mayores. La importancia de la reflectividad de los materiales es asimismo considerable, pues se comprueba que las superficies que absorben mayor cantidad de radiación solar presentan temperaturas más altas. Sería el caso de las plazas y calles amplias, de materiales muy absorbentes y bien expuestos a la incidencia del sol, frente a las zonas menos soleadas, con presencia de arbolado o espacios verdes. Tráfico y temperatura presentan una correlación positiva: a mayor tráfico, ambiente más cálido. Pero, contrariamente a lo esperado, su incidencia es bastante menor que la que tienen los factores anteriores.

Al relacionar la localización de la isla de calor con la dirección del viento se comprueba que cuando sopla viento del NW las temperaturas máximas se mueven hacia el

Este. La diferencia con los barrios occidentales se hace patente, y de manera especial con los sectores más abiertos a la influencia del viento. Bien distinta es la situación cuando sobre Zaragoza sopla viento de bochorno (SE). En estos casos la isla térmica es empujada en dirección hacia el Oeste y la zona Centro.

Los resultados alcanzados ponen de relieve la magnitud y características de los cambios que impone el medio urbano: el espacio edificado, el tráfico, la topografía, las superficies ajardinadas, la red viaria o los materiales de construcción son algunos de los factores considerados más relevantes que hacen que se origine una importante modificación climática y la clara aparición de una isla de calor. La isla dominante en el centro de la ciudad, pero varía en el tiempo y espacio, dando lugar a diferentes configuraciones espaciales como consecuencia fundamentalmente de las variaciones en la dirección del viento.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación se ha desarrollado con la ayuda de los siguientes proyectos: «Clima y calidad ambiental en la ciudad de Zaragoza», financiado por la Concejalía de Medio Ambiente del Ayuntamiento de Zaragoza, Caracterización espacio-temporal de las sequías en el valle medio del Ebro e identificación de sus impactos (BSO2002-02743), y Variabilidad climática y dinámica forestal en ecosistemas de ecotono (REN2003-07453) financiados por la CICYT y FEDER, y por el «Programa de grupos de investigación consolidados» (BOA 147 de 20-04-2005), financiado por el Gobierno de Aragón. La investigación del segundo autor contó con la ayuda de una beca postdoctoral del Ministerio de Educación y Ciencia.

BIBLIOGRAFÍA

- ARNFIELD, A.J. (2003): «Two decades of urban climate research: a review of turbulence, exchanges of energy and water, and the urban heat island». *International Journal of Climatology* 23: 1-26.
- BERAL-GUYONNET, I. (1997): «Analyse spatiale des températures mensuelles dans l'agglomération lyonnaise». *Revue de Géographie de Lyon* 72: 263-266.
- BORROUGH, P.A. y MCDONNELL, R.A. (1998): *Principles of Geographical Information Systems*. Oxford University Press, Oxford.
- CUADRAT, J.M. (1994): «Los climas urbanos en el Valle del Ebro». En: López Gómez, A. (Coord). *El clima de las ciudades españolas*. Edit. Cátedra. Madrid: 205-230.
- CUADRAT, J.M., DE LA RIVA, J., LÓPEZ, F. y MARTI, A. (1993): «El medio ambiente urbano en Zaragoza. Observaciones sobre la isla de calor». *Anales Univ. Complut.*, 13: 127-138.
- CUADRAT, J.M. (1999): *El clima de Aragón*. Institución Fernando El Católico: Zaragoza.
- CUADRAT, J.M.; SAZ, M.A. y VICENTE-SERRANO, S. (2003): «Surface wind direction influence on spatial patterns of urban heat island in Zaragoza (Spain)». *Geophysical Research Abstracts*, 5: 02592. European Geophysical Society.

- CUADRAT, J.M. (2004): «Patrones temporales de la isla de calor urbana de Zaragoza». En: Faus, M.C. (Coord.). *Aportaciones geográficas en homenaje al profesor Higuera*. Universidad de Zaragoza. Zaragoza: 63-70.
- DE LA RIVA, J.; CUADRAT, J.M.; LÓPEZ, F. y MARTÍ, A. (1997): «Aplicación de las imágenes Landsat TM al estudio de la isla de calor térmica de Zaragoza». *Geographica*, 35: 24-36.
- DIMOUDI, A. y NIKOLOPOULOU, M. (2003): «Vegetation in the urban environment: microclimatic analysis and benefits». *Energy and Buildings*, 35: 69-76.
- ELIASSON, I. (1994): «Urban-suburban-rural air temperature differences related to street geometry». *Physical Geography*, 15: 1-22.
- FERNÁNDEZ, F.; GALÁN, E. y CAÑADA, R. (Coord.) (1998): *Clima y ambiente urbano en ciudades ibéricas e iberoamericanas*. Editorial Parteluz. Madrid.
- GEDZELMAN, S.D.; AUSTIN, S.; CERMAK, R.; STEFANO, N.; PARTRIDGE, S.; QUESENBERRY, S. y ROBINSON, D.A. (2003): «Mesoscale aspects of the Urban Heat Island around New York City». *Theoretical and Applied Climatology*, 75: 29-42.
- HAIR, J.F., ANDERSON, R.E., TATHAM, R.L. y BLACK, W.C. (1998): *Multivariate data analysis*. Prentice Hall International, Inc. 799 pp.
- HOGAN, AW y FERRICK, MG. (1988): «Observations in nonurban heat islands». *Journal of Applied Meteorology* 37: 232-236
- JAUREGUI, E. (1997): «Heat island development in Mexico City». *Atmospheric Environment* 31: 3821-3831
- JUNK, J. HELBIG, A. y LÜERS, J. (2003): «Urban climate and air quality in Trier Germany». *International Journal of Biometeorology* 47: 230-238
- KAISER, H.E. (1958): «The varimax criterion for analytic rotation in factor analysis». *Psikometrika*, 23: 187-200.
- KLYSIK, K. y FORTUNIAK, K. (1999): «Temporal and spatial characteristics of the urban heat island of Łódź», Poland. *Atmospheric Environment* 33: 3885-3895
- LANDSBERG, H.E. (1981): *The Urban Climate*. Academic Press: New York.
- LÓPEZ GÓMEZ, A. (1993): *El clima de las ciudades españolas*. Cátedra: Madrid.
- LÓPEZ MARTÍN, F. (1998): «Nota sobre el viento en el casco urbano de Zaragoza: un factor de planificación urbana». En: Fernández, F et al. (Coord). *Clima y ambiente urbano en ciudades ibéricas e iberoamericanas*. Edit. Parteluz. Madrid: 371-380.
- LÓPEZ MARTÍN, F.(2002): *El medio ambiente urbano de la ciudad de Zaragoza*. Universidad de Zaragoza. Tesis Doctoral (inérita).
- LOWRY WP. (1977): «Empirical estimation of urban effects on climate: a problem analysis». *Journal of Applied Meteorology* 36: 1377-1391
- MORENO, M.C. (1994): «Intensity and form of the urban heat island in Barcelona». *International Journal of Climatology* 14: 705-710.
- MONTÁVEZ, J.P., RODRÍGUEZ, A. y JIMÉNEZ, J.I. (2000): «A study of the urban heat island of Granada». *International Journal of Climatology*. 20: 899-911.
- MORRIS, CJ. SIMMONDS, I y PLUMMER, N. (2001): «Quantification of the influences of wind and cloud on the nocturnal urban heat island of a large city». *Journal of Applied Meteorology* 40: 169-182.

- OKE, TR. (1995): «The heat island of the urban boundary layer: characteristics, causes and effects». In *Wind Climate in Cities*. Cermak JE. (ed). Kluwer-Academic Publ. Norwell.
- PALÁ, V. y PONS, X. (1995): «Incorporation of relief in polynomial based geometric corrections». *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 61: 935-944.
- PONS, X. y SOLÉ, L. (1995): «A simple radiometric correction model to improve automatic mapping of vegetation from multispectral satellite data». *Remote Sensing of Environment*, 48: 191-204.
- RICHMAN, M.B. (1986): «Rotation of Principal Components». *Journal of Climatology*, 6: 29-35.
- SAZ, M.A.; VICENTE-SERRANO, S. y CUADRAT, J.M. (2003): «Spatial patterns estimation of urban heat island of Zaragoza (Spain) using GIS». *Fifth International Conference on Urban Climate*. Lodz (Poland): 409-412.
- SCHMIDLIN, T.W. (1989): «The urban heat island at Toledo, Ohio». *Ohio Journal of Science* 89: 38-41
- STEINECKE, K. (1999): «Urban climatological studies in the Reykjavík subarctic environment», Iceland. *Atmospheric Environment* 33: 4157-4162.
- SZEGEDI, S. y KIRCSI, A. (2003): «The development of the urban heat island under various weather conditions in Debrecen, Hungary». In *Proceedings of the Fifth International Conference on Urban Climate*. WMO-University of Łódź: Łódź, Poland.
- TAPPER, NJ. (1990): «Urban influences on boundary layer temperature and humidity: results from Christchurch, New Zealand». *Atmospheric Environment* 24: 19-27
- TUCKER, C.J. (1979): «Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation». *Remote Sensing of Environment* 8: 127-150.
- TUCKER, C.J., B.N. HOLBEN, J.H. ELGIN y MCMURTREY, J.E.. (1981): «Remote Sensing of total dry matter accumulation in winter wheat». *Remote Sensing of Environment* 11: 171-189.
- UNWIN, DJ. (1980): «The synoptic climatology of Birmingham's heat island». *Weather* 35: 43-50
- UPMANIS, H. y CHEN, D. (1999): «Influence of geographical factors and meteorological variables on nocturnal urban-park temperature differences. A case study of summer 1995 in Göteborg». *Climate Research* 13: 125-139.
- VICENTE-SERRANO, S., CUADRAT, J.M. y SAZ, M.A. (2003): «Topography and vegetation cover influence on urban heat island of Zaragoza (Spain). *Fifth International Conference on Urban Climate*. Lodz (Poland): 305-308.
- WYLIE, B.K., D.J. MEYER, TIESZEN, L. y MANNELS.S.(2002): «Satellite mapping of surface biophysical parameters at the biome scale over the North American grassland. A case study». *Remote Sensing of Environment* 79: 266-278.
- WINKLER, J.A., SKAGGS, R.H., y BAKER, D.G. (1981): «Effects of temperature adjustments on the Minneapolis-St Paul urban heat island». *Journal of Applied Meteorology*, 20: 1295-1300.
- YAMASHITA S, SEKINE K, SHODA M, YAMASHITA K, y HARA, Y. (1986): «On relationships between heat island and sky view factor in the cities of Tama River basin, Japan». *Atmospheric Environment* 20: 681-686.

- YAN, Y., OLIVER, JE. (1996): «The CLO: a utilitarian unit to measure weather/climate comfort». *International Journal of Climatology* 16. 1045-1056
- ZHANG, Y. (1999): «Optimisation of building detection in satellite images by combining multispectral classification and texture filtering». *ISPR Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 54: 50-60.

