

## ESTUDIO DE LAS BANDAS TÉRMICAS DEL ETM EN LA COMUNIDAD DE MADRID Y ALREDEDORES

M.<sup>a</sup> Eugenia PÉREZ GONZÁLEZ y M.<sup>a</sup> Pilar GARCÍA RODRÍGUEZ

*Dpto. Análisis Geográfico Regional y Geografía Física. Universidad Complutense de Madrid*

### RESUMEN

El análisis de las bandas térmicas del último sensor del satélite Landsat-7 (ETM) en una imagen de la Comunidad de Madrid permite conocer la variabilidad espacial de la temperatura superficial a las 10:48 horas (TMG) y contrastar sus resultados con los obtenidos por el sensor AVHRR del satélite NOAA-14 y datos de estaciones meteorológicas. Los numerosos espacios urbanos (Madrid, Getafe, Leganés, Alcorcón, Móstoles, Fuenlabrada, Torrejón de Ardoz, Alcobendas, etc.) muestran temperaturas superficiales diurnas más bajas que sus entornos inmediatos a finales del verano. Creemos que la mayor irradiación desde posiciones elevadas por parte de los edificios de estos núcleos urbanos, así como la mayor inercia térmica, diferente volumen, y presencia de sombras dan lugar a temperaturas más bajas, de modo que todos los núcleos se discriminan perfectamente en los canales térmicos por sus menores temperaturas.

**Palabras clave:** Landsat-7, canales térmicos, Madrid, clima urbano.

### ABSTRACT

*In this paper are analysed the thermal bands with ETM sensor of Landsat-7 satellite in Madrid Community. These images allow to detected the thermal brightness variability at 10:48 hours (TMG) and to contrast its results with the obtained ones for the sensor AVHRR with the satellite NOAA-14 and meteorological data. The numerous urban spaces (Madrid, Getafe, Leganés, Alcorcón, Móstoles, Fuenlabrada, Torrejón de Ardoz, Alcobendas, etc.) show lower bright temperatures than their immediate environments at the end of the summer. We believe that the biggest irradiation from the top of the buildings gives these cities, as well as the greater inertia thermal, different bulk, and shades cause lower temperatures, so all cities or villages are discriminated against the surrounding field perfectly in the thermal channels by their lower temperatures.*

**Key words:** Landsat-7, thermic channels, Madrid, urban climate.

## 1. INTRODUCCIÓN

El trabajo tiene como finalidad analizar los datos de las bandas térmicas del sensor ETM del satélite Landsat 7 de una imagen de la Comunidad de Madrid y parte de las provincias limítrofes (185 X 185 km). El sensor ETM fue puesto en funcionamiento a primeros del año 1999 e incorpora mejoras notables respecto al TM del satélite Landsat 5. El canal térmico del TM con una longitud de onda entre 10.4 y 12.5 micrómetros, se ha dividido en el ETM en dos bandas: la banda 8 está entre 10.4-11.4 m y la banda 6 entre 11.4-12.5 m, similares a los canales 4 y 5 del sensor AVHRR del satélite NOAA. Además, destaca la mayor resolución espacial de estas bandas (60 m frente a los 120 m del anterior). Este sensor tiene también una banda pancromática con resolución de 15 metros con la que se discriminan muy bien los diferentes espacios urbanos e intraurbanos, redes viarias, residencias secundarias, cauces de ríos, naves industriales, parcelas cultivadas, etc. Las primeras imágenes enviadas por este satélite se empezaron a procesar en Europa en julio de 1999. Por esta razón apenas existe aún bibliografía publicada referente a este satélite, ni se han establecido fórmulas para transformar los valores de números digitales en grados de temperatura, como ya se realizó para el canal 6 del sensor TM (WUKELIC *et al.*, 1989).

Son numerosos los trabajos sobre clima urbano, y concretamente de Madrid, que se han venido desarrollando desde la Universidad Autónoma de Madrid, con numerosas publicaciones al respecto (ARROYO ILERA, 1991; FERNÁNDEZ GARCÍA *et al.*, 1998 a y b; LÓPEZ GÓMEZ, *et al.*, 1991 y 1995, etc.). Si bien en muchos de ellos se comenta la menor incidencia de la "isla de calor" en verano y durante el día, la mayor parte de los trabajos, confrontan los datos entre los distintos puntos del entramado urbano y periurbano de la megalópolis madrileña. Aquí, modestamente queremos aportar la información ofrecida por un sensor de reciente lanzamiento al espacio, de gran resolución espectral y espacial y, analizar las temperaturas superficiales de todos los conjuntos urbanos respecto a sus entornos próximos. Aún cuando se contrastan otras fechas, el trabajo se centra en imágenes de verano, momentos en los que la "isla de calor" en las imágenes diurnas no se muestra como tal.

## 2. ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio comprende la provincia de Madrid y parte de Ávila, Segovia, Guadalajara, Cuenca y Toledo, con una extensión de 3918 hectáreas. En este espacio se diferencian claramente tres grandes unidades morfológicas: sierra, piedemonte y campiña. En la primera destaca el Sistema Central que corta la imagen en una franja con dirección NE-SW e incluye la Sierra de Guadarrama y las estribaciones de Gredos; en el nordeste de la imagen aparece la Sierra de Altomira. Los piedemontes se observan tanto en la vertiente norte como en la sur del Sistema Central, resaltando en esta última la presencia de las rañas en el nordeste de la imagen. Dentro de la campiña, constituida en su mayor parte por sedimentos terciarios y cuaternarios, se aprecian con nitidez los valles de los ríos Tajo y sus afluentes, Tajuña, Henares, Jarama, Manzanares, Guadarrama y Alberche y, en el noroeste de la imagen, algunos afluentes del Duero, Adaja y Voltoya. La cubierta vegetal está muy vinculada a las anteriores unidades geomorfológicas: en la Sierra y piedemontes la vegetación natural (coníferas, planifolias y estrato arbustivo) presenta una gran vigorosidad, claramente discriminable en los infrarrojos próximos. La vegetación higrófila y

los regadíos cubren los valles de los ríos, mostrando también altos contenidos en clorofila. El resto del área está ocupada por cultivos en secano (ya recolectados en agosto), barbechos o vegetación arbustiva (poco densa) y suelos descubiertos. Además de la cubierta natural hay que destacar la importancia de los núcleos urbanos y la alteración que introduce en el paisaje la alta densidad demográfica (industrias, infraestructuras viarias, áreas residenciales, etc.). Cabe resaltar también el alto número de embalses que se localizan en el área de estudio (más de 25) que tendrán una clara significación en los distintos microclimas de la Comunidad.

### 3. MATERIAL Y MÉTODOS

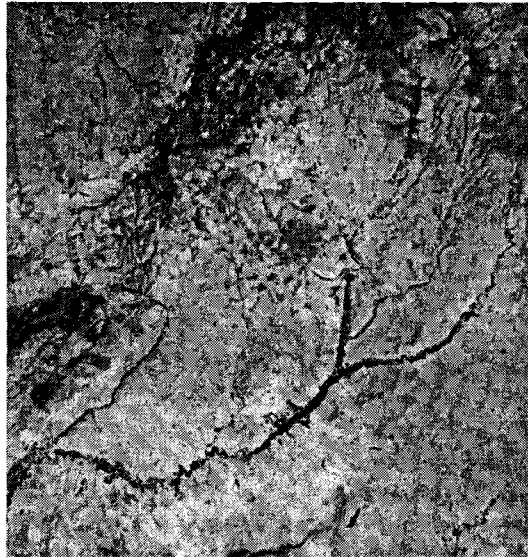
Para realizar el estudio mesoclimático se ha efectuado un análisis visual y digital de los canales térmicos de los distintos sensores, escogiendo imágenes de agosto de 1999 (del día 20 a las 10:48 horas y del 22 a las 15:00 horas para los sensores ETM y AVHRR respectivamente). Del satélite NOAA se escogieron además imágenes diurnas (entre las 15:00 y 15:30 horas, TMG) de otras fechas (marzo, julio, septiembre y noviembre) con el fin de conocer la variabilidad temporal de las temperaturas superficiales de la Comunidad de Madrid. Para conocer en detalle las diferencias de la temperatura superficial se han seleccionados 100 puntos distribuidos por todo el área, siendo representativos de distintas unidades y cubiertas: embalses, núcleos urbanos, pueblos, urbanizaciones, vegetación y también, otros coincidentes con las estaciones meteorológicas con datos termométricos diarios. De ellos, se ha analizado la variabilidad espacial y espectral de los números digitales de las bandas 6 y 8 (infrarrojos térmicos) del sensor ETM y los canales térmicos (4 y 5) del sensor AVHRR del NOAA-14.

Al no poder transformar, de momento, los números digitales (ND) de las bandas 6 y 8 a valores de temperatura superficial, se han calculado para éstas los principales estadísticos (coeficiente de correlación, recta de regresión de cada banda, rangos, desviaciones típicas, etc.) con el fin de conocer la información más relevante de cada banda térmica y, contrastarla con los datos aportados por las estaciones meteorológicas y otros sensores remotos. También se han hecho varios cortes espaciales, para ver la variabilidad de los ND a través de distintas superficies.

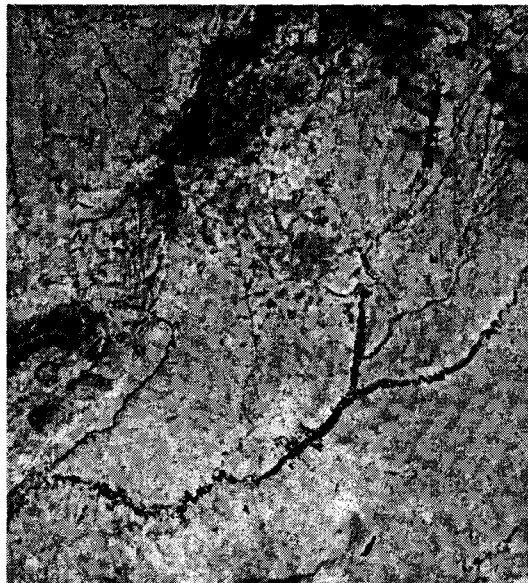
Las diferentes imágenes han sido corregidas geométrica y radiométricamente y, las imágenes NOAA también atmosféricamente. No obstante, en el caso de la imagen Landsat-7 se ha preferido utilizar los valores digitales originales y, sólo para realizar los perfiles espaciales utilizar la imagen georeferida.

### 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Al efectuar un análisis visual de los canales térmicos del ETM se pueden observar una serie de hechos (fig. 1): en ambas bandas destacan con nitidez las sierras, los embalses y los cursos fluviales (junto con las parcelas dedicadas a regadío), debido a que presentan, como cabría esperar, las temperaturas más bajas de todo el área, por lo que muestran tonos oscuros. Esto es lógico, puesto que la sierra tiene normalmente temperaturas inferiores al resto de la Comunidad de Madrid, tanto en datos medidos directamente en el suelo, como en los del aire de las estaciones



Banda 6



Banda 8

Fig. 1: Bandas térmicas del sensor ETM de la escena 201/32

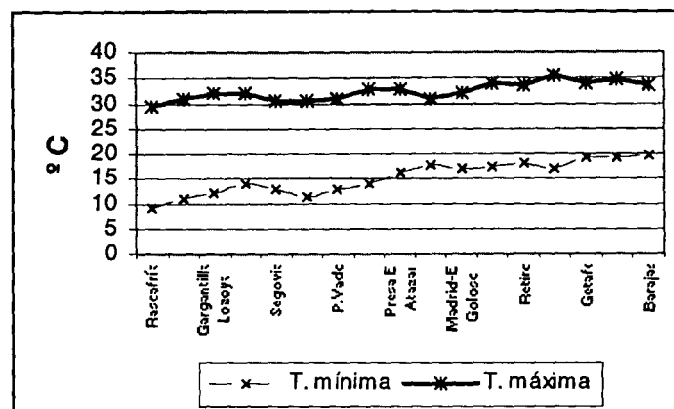


Fig. 2: Temperaturas máximas y mínimas del 19 y 20-8-1999.

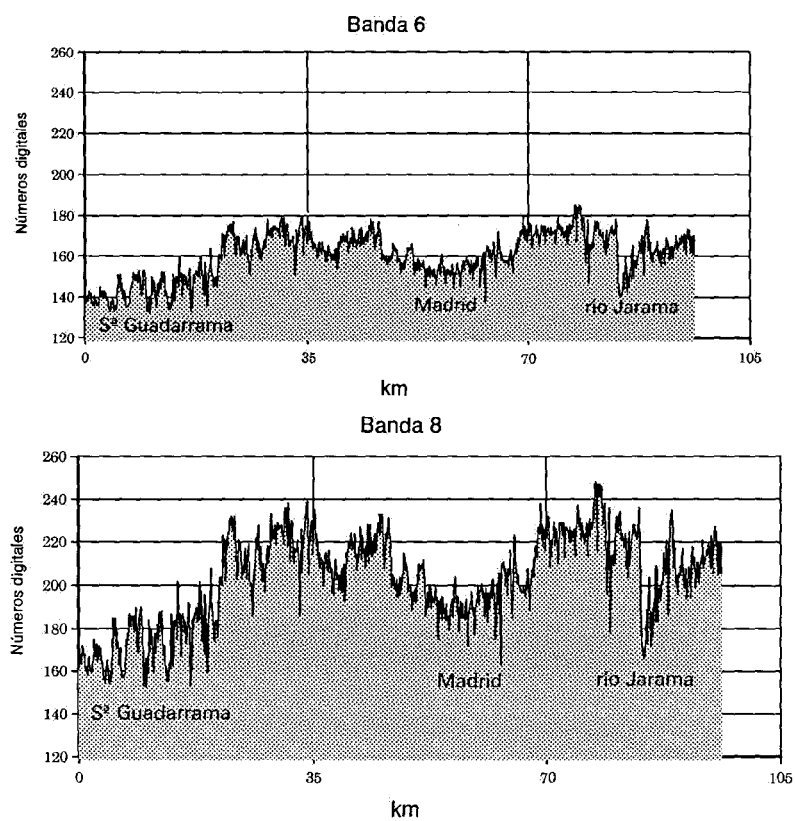


Fig. 3: Perfiles térmicos ETM, Guadarrama-Jarama, 20-8-1999.

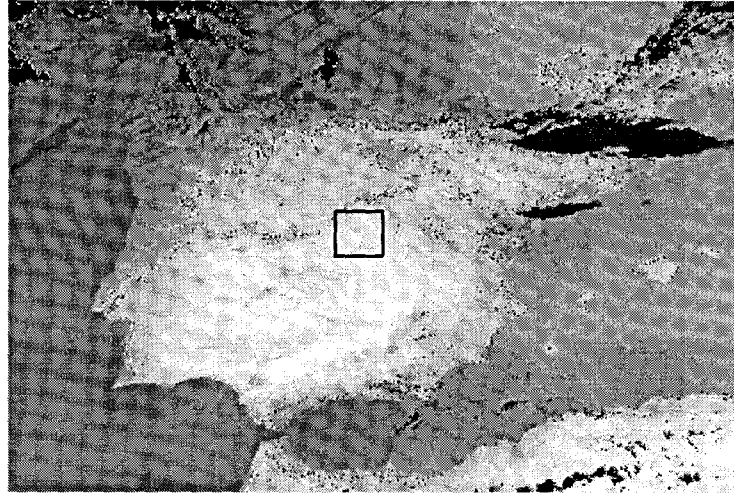


Imagen NOAA de Madrid

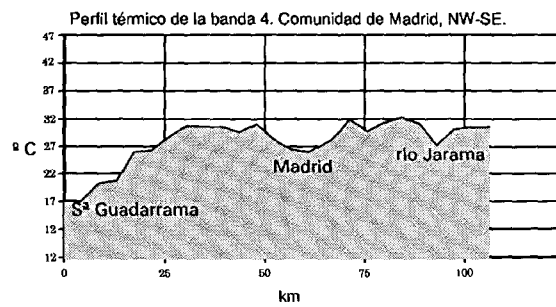


Fig. 4: Imagen NOAA del 22-8-1999

meteorológicas (fig. 2); las masas de agua (embalses y ríos) tienen temperaturas más bajas que el entorno a estas horas, debido a su mayor inercia térmica; las áreas de regadío próximas a los ríos tienen también temperaturas más bajas a causa de su mayor humedad. En contraposición a esto, cabe señalar como hecho destacado, que después de estas áreas, se delimitan claramente los núcleos urbanos por presentar temperaturas inferiores al espacio no urbanizado. Así, la ciudad de Madrid y los núcleos próximos, especialmente los del sur (Móstoles, Alcorcón, Getafe, Leganés, etc), se pueden discriminar térmicamente con nitidez debido a la mayor superficie urbana y contraste con las tierras de secano del entorno. Este hecho resulta sorprendente, ya que Madrid y su área metropolitana se han estudiado como un ejemplo claro de “isla de calor” (LÓPEZ GÓMEZ, *et al.*, 1984, 1990, 1993 y 1995). Debe matizarse que en situaciones de gran estabilidad atmosférica, elevada insolación y vientos en calma, los núcleos urbanos muestran temperaturas superficiales y del aire más bajas que los campos dedicados a cereales de secano. En las imágenes de las dos bandas térmicas se pueden apreciar con claridad estos núcleos urbanos, con valores digitales inferiores a los alrededores (la mayor parte campos de cereales ya recolectados). Estos datos se confirman al realizar cortes espaciales con los valores digitales de ambas bandas (figs. 3 y 4).

En conjunto, después de las masas de agua y la sierra, los núcleos urbanos tienen los valores digitales más bajos. No existe una razón clara para explicar esta “presumible anomalía” si bien es posible aventurar varias hipótesis:

- la presencia de contaminantes absorben parte de las radiaciones infrarrojas, aunque la mayor parte afecta a los IR medios
- el sensor capta la superficie de la cubierta del suelo que, en el caso de las grandes ciudades, está en muchas ocasiones a mayor altura, debido a las edificaciones
- a las 10:48 de la mañana, las sombras proyectadas por los edificios retrasan el rápido ascenso de las temperaturas superficiales
- importante extensión de áreas verdes (parques, arbolado en las calles, etc)
- escasa capacidad de almacenar calor de los materiales de construcción y redes viarias frente al suelo casi desnudo de las áreas interurbanas, lo que repercute en distinta inercia térmica
- mayor humedad
- diferencia de volumen (campo-ciudad) por unidad de superficie frente a la misma insolación.

En todos los casos el contraste entre las distintas cubiertas es más acusado en la banda 8 (fig. 1) que en la 6, por el mayor rango de valores de la primera, si bien las diferencias son siempre poco significativas (fig. 5). Los estadísticos básicos de las dos bandas térmicas están recogidos en la Tabla 1.

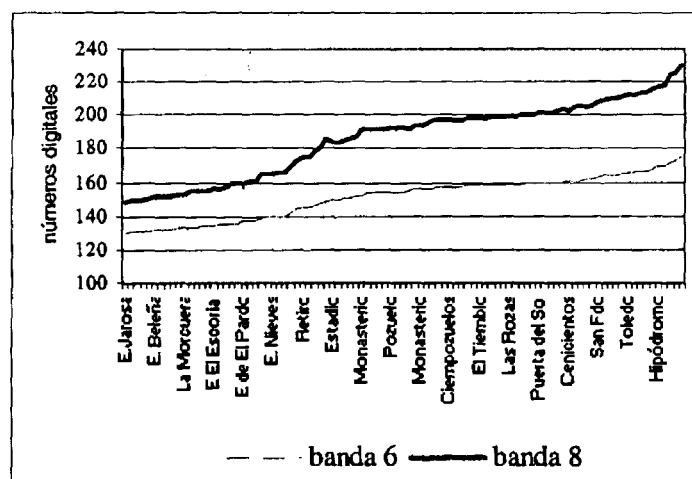


Fig. 5: Valores digitales del sensor ETM

Tabla 1. ESTADÍSTICOS DEL SENSOR ETM

	Banda 6	Banda 8
Mínimo	130	149
Máximo	175	230
Promedio	151	186
Mediana	154	193
Desviación típica	12,5	21,91
Rango	45	81

La correlación entre ambas bandas es altísima (0,999) y la obtenida en los puntos de muestreo entre los canales térmicos (temperatura superficial o de brillo) y la temperatura máxima del aire de las estaciones meteorológicas varía de 0,849 (banda 8) a 0,748 (banda 6). Cabe destacar que la relación entre los valores digitales registrados en el agua de los embalses y la temperatura máxima del aire en los mismos, registradas junto a las presas, es muy baja. Por el contrario, la relación es mucho más elevada entre la temperatura del termómetro seco y los valores digitales de las bandas térmicas para todas las estaciones urbanas.

Al analizar las temperaturas máximas y mínimas de las estaciones meteorológicas para el mismo día de la imagen Landsat (fig. 2), destacan todas las estaciones urbanas con valores mínimos (entre las 5:40 y 7:00 horas) más elevados que las rurales (Talamanca del Jarama respecto a Madrid o Rascafría respecto a Segovia), dando lugar a “la isla de calor” nocturna. Además, la amplitud térmica diaria resulta mayor en las estaciones rurales, con temperaturas diurnas más altas y mínimas más bajas que en los numerosos núcleos urbanos, independientemente del tamaño, altura de los edificios, superficies verdes, etc. Por ello, parece que entre todos los factores condicionantes a la desigual temperatura campo-ciudad, el que debe influir en mayor medida es el diferente volumen



superficial entre ambos espacios. Así, expuestos a la misma insolación, la temperatura es menor a mayor volumen. Es evidente que la isla de calor se incrementará en intensidad y duración cuando se incorporen a la atmósfera los numerosos focos de calor urbanos, que para el caso de Madrid son mínimos en verano.

La imagen del satélite NOAA del día 22 de agosto muestra variaciones térmicas espaciales similares a la del sensor ETM (fig 4); en ella se puede apreciar que la sierra y los cursos fluviales son los que registran las temperaturas más bajas de la imagen. Los valores térmicos de la ciudad de Madrid también son menores que el espacio rural del entorno, aún cuando la imagen ha sido tomada a las 15 horas (TMG); sin embargo no se discriminan tan claramente los núcleos urbanos próximos a la capital debido a la menor resolución espacial del sensor AVHRR (1,1 km).

La discriminación térmica que se obtiene mediante el análisis visual en la imagen de agosto no se repite en otros meses del año, al menos de forma tan nítida, pues en las bandas 4 y 5 de las imágenes NOAA del 30 de marzo, 30 de septiembre y 8 de noviembre de 1999 y 4 de julio del 2000, no hemos podido delimitar los diferentes núcleos urbanos de la Comunidad de Madrid. No obstante, el análisis digital de las áreas de muestreo refleja la siguiente gradación térmica en orden ascendente: sierra, río y vegetación higrófila, núcleos urbanos y campos de cereales de secano (al norte y sudeste de Madrid). En la Tabla 2 se recogen las temperaturas de brillo de las distintas fechas, obtenidas mediante la transformación de los números digitales de las bandas 4 y 5 a partir de la fórmula de CASELLES *et al.*(1997).

Tabla 2. TEMPERATURAS SUPERFICIALES DE LOS PUNTOS DE MUESTRO (° C) DE LAS IMÁGENES NOAA-14

	30-3-99	22-8-99	30-9-99	8-11-99	4-7-00
S. <sup>a</sup> Guadarrama	10,5	31,0	15,9	9,1	23,8
Río Jarama	13,8	37,1	30,3	13,4	34,5
Secano N	33,3	48,1	27,1	16,4	37,2
Secano SE	28,2	45,2	25,8	19,6	40,3
Madrid	22,2	40,7	24,8	17,3	35,5

De la Tabla 2 se deduce que las diferencias térmicas superficiales campo-ciudad son máximas en Madrid a finales del verano (entre 4,5 y 7°C) y mínimas en otoño (entre -0,9 y 2,3° C), fecha en la que la tendencia al mayor caldeoamiento diurno del espacio rural respecto al urbano puede llegar a invertirse.

## 5. CONCLUSIONES

El estudio de las temperaturas superficiales o de brillo obtenidas mediante los sensores ETM (Landsat 7) y AVHRR (NOAA-14) y las temperaturas del aire de las estaciones meteorológicas permite conocer con precisión la variabilidad térmica de la Comunidad de Madrid.

La isla de calor urbana, que afecta tanto a la capital como a numerosos municipios de la región, es nítida y bastante permanente durante la noche. Sin embargo, presenta una gran variabilidad

estacional durante el día.

La información obtenida a partir de las imágenes de satélite y de las estaciones meteorológica revela temperaturas diurnas más bajas que el entorno, especialmente a finales de verano, en todos los núcleos urbanos, independientemente del tamaño, altura de los edificios, anchura de las calles, masa vegetal, etc, lo que induce a pensar en una mayor inercia térmica de las ciudades frente a un entorno dominado por cultivos de secano ya recolectados.

Los canales térmicos de las imágenes ETM, con alta resolución espacial, resultan muy útiles para cartografía distintos elementos del terreno: núcleos urbanos, cursos fluviales, masas vegetales, embalses, etc.

Los numerosos embalses de La Comunidad de Madrid ejercen una amortiguación térmica, comportándose como islas de frío durante el día y de calor durante la noche.

## 6. REFERENCIAS

ARROYO ILERA, F. y FERNÁNDEZ GARCÍA, F. (1991): “*Aproximación al conocimiento del confort térmico urbano de Madrid*”. Universidad Autónoma de Madrid, 109 pp.

CASELLES, V.; COLL, C.; RUBIO, E.; SOSPEDRA, F. y VALOR, E. (1997): “La medida de la temperatura y de la emisividad desde satélites: estado actual y perspectivas futuras”. En “*Teledetección: usos y aplicaciones*” (CASANOVA, J.L. y SANZ, J., Eds.). 487-492. Ed. Univ. Valladolid.

FERNÁNDEZ GARCÍA, F.; GALÁN GALLEGO, E. y CAÑADA TORRECILLA, R. (Coords.) (1998a): “*Clima y Ambiente urbano en las ciudades Ibéricas e Iberoamericanas*”. Parteluz, Madrid, 606 pp.

FERNÁNDEZ GARCÍA, F.; LÓPEZ GÓMEZ, A.; FERNÁNDEZ RENAU, A. GARCÍA HERNÁNDEZ, E. y ARROYO ILERA, F. (1998b): “*Temperaturas nocturnas y diurnas en Madrid a partir de teledetección aerotransportada*”. C.S.I.C. y Parteluz, Madrid, 83 pp.

LÓPEZ GÓMEZ, A. y FERNÁNDEZ GARCÍA, F. (1984): “La isla de calor en Madrid. Avance de un estudio de clima urbano”. *Estudios Geográficos*, 174: 5-34.

LÓPEZ GÓMEZ, A.; MORENO JIMÉNEZ, A.; FERNÁNDEZ GARCÍA, F. y PALOU, F. (1990): “La temperatura diurna en la aglomeración de Madrid mediante imágenes remotas”. *Estudios Geográficos*, 201: 705-732.

LÓPEZ GÓMEZ, A.; FERNÁNDEZ GARCÍA, F. y ARROYO ILERA, F. (1991): “*El clima urbano de Madrid: la isla de calor*”. C.S.I.C., Madrid, 196 pp.

LÓPEZ GÓMEZ, A.; FERNÁNDEZ GARCÍA, F.; ARROYO ILERA, F.; MARTÍN VIDE, J. y CUADRAT, J.Mª (1993): “*El clima de las ciudades españolas*”. Ed. Catedra, 268 pp.

LÓPEZ GÓMEZ, A.; FERNÁNDEZ GARCÍA, F. y ARROYO ILERA, F. (1995): “*Teledetección y clima urbano: variaciones nocturnas y diurnas de la isla de calor en Madrid*”. Instituto de Economía y Geografía, C.S.I.C., 75 pp.

WUKELIC, G.E.; GIBBONS, D.E.; MARTUCCI, L.M. y FOOTE, H.P. (1989): “Radiometric calibration of Landsat Thematic Mapper Thermal Band”. *Remote Sensing Environmental*, 28: 339-347.