

INFLUENCIA DE LA URBANIZACIÓN EN LAS SERIES TERMOMÉTRICAS DE BALEARES

José Antonio GUIJARRO

Instituto Nacional de Meteorología, Centro Meteorológico en Illes Balears

Resumen

Se ha evaluado la influencia de la urbanización en los promedios mensuales de temperaturas máximas y mínimas de Baleares mediante ecuaciones de regresión múltiple, así como el efecto del crecimiento urbano en las series mensuales de Palma de Mallorca por comparación con las de su aeropuerto.

Palabras clave: FACTOR, URBANO, CARTOGRAFIA, TEMPERATURA.

Abstract

The influence of urbanization on the monthly means of maximum and minimum temperature in the Balearics has been evaluated through multiple regression analysis, and the effect of urban growth on Palma de Mallorca monthly series through comparison with those from its airport.

Keywords: FACTOR, URBAN, CARTOGRAPHY, TEMPERATURE.

Résumé

L'influence de l'urbanisation dans les moyennes mensuelles des températures maximales et minimales de Baléares a été évaluée au moyen d'équations de régression multiple, ainsi que l'effet de l'accroissement urbain dans les séries mensuelles de Palma de Mallorca par comparaison avec celles de son aéroport.

Mots clé: FACTEUR, URBAIN, CARTOGRAPHIE, TEMPERATURE.

1. Introducción

La influencia de las ciudades en las temperaturas locales es conocida hace tiempo. Ya en el siglo pasado se realizaron estudios del efecto *isla de calor* en Londres (HOWARD, 1833) y París (RENOU, 1862). Y en la tercera década de nuestro siglo se comenzó a estudiar este efecto mediante medidas realizadas a bordo de automóviles en Viena (SCHMIDT, 1929) y Karlsruhe (PEPPLER, 1929). Más recientemente, y refiriéndonos a nuestro país, encontramos trabajos tanto en ciudades grandes, como Madrid (LOPEZ et al., 1988; LOPEZ, 1993) y Barcelona (MARTIN-VIDE, 1990; MORENO-GARCIA, 1994), como en otras de tamaño más reducido, caso de Logroño (GARCIA-RUIZ, 1989) y Santa Cruz de Tenerife (DORTA et al., 1990).

En general lo que se observa es: a) una disminución de la oscilación termométrica diaria, atribuible a la mayor capacidad calorífica de los materiales de construcción y mayor superficie de intercambio en una zona urbanizada respecto a un espacio abierto en la periferia de la misma; y b) un aumento de la temperatura media en la zona urbana, debida a la generación de calor asociada a las actividades humanas (respiración, transporte, calefacción, etc). La combinación de ambos efectos hace que las diferencias más notables se den al comparar las temperaturas mínimas urbanas con las de su entorno, puesto que en ambos casos se produce un aumento en el núcleo urbano. En cambio, las temperaturas máximas se ven aumentadas por la generación de calor, y disminuidas por la menor oscilación termométrica, con lo que las diferencias respecto a la periferia son menos acusadas, y de diverso signo según las circunstancias.

El efecto *isla de calor* urbana tiene una gran trascendencia para el estudio del clima: las medidas de las estaciones termométricas afectadas ven reducida su representatividad a la escala microclimática. Y, dado que una gran propor-

ción de estaciones climatológicas se hallan ubicadas en núcleos de población de diverso tamaño, en la elaboración de mapas termométricos debería tratar de filtrarse este efecto.

En cuanto a los análisis temporales de las series termométricas, no tendría mucha importancia si la perturbación urbana tuviera una magnitud constante, pero ésto tampoco es así: históricamente la tendencia generalizada de la evolución de las ciudades las ha conducido a un aumento de su tamaño y, paralelamente, la elevación del nivel de vida en el mundo occidental ha llevado aparejado un incremento en el consumo de energía por habitante. Todo ello ha desembocado en una mayor magnitud del efecto de la urbanización sobre las series termométricas a lo largo del tiempo, efecto que es necesario filtrar para el estudio de las fluctuaciones climáticas (JONES et al, 1989).

En este trabajo se estudiará la influencia de la urbanización en las series de temperaturas medias mensuales de Baleares bajo esos dos aspectos: 1) la distribución espacial de los promedios termométricos en todo el archipiélago, y 2) las series de la ciudad de Palma.

2. El factor urbanización en la cartografía automática de temperaturas medias mensuales

Para la obtención de mapas mensuales de temperaturas medias y extremas de Baleares se partió de los promedios de temperaturas máximas y mínimas (diarias y mensuales) de 34 estaciones repartidas por todo el archipiélago (fig. 1). Estas estaciones se seleccionaron al requerir que tuvieran un mínimo de 5 años de observación en el periodo de estudio (1961-80), si bien 20 de ellas disponían de 10 o más años de funcionamiento en dicho periodo. Se prestó especial atención a fragmentar las series, atribuyéndolas a estaciones distintas, cuando hubieran sufrido cambios de emplazamiento importantes, y particularmente si se habían trasladado de un núcleo urbano a la periferia o viceversa.

Una vez recopiladas las series, se procedió a completarlas mediante estima de los datos ausentes. Para ello se calcularon primeramente las matrices de coeficientes de regresión y correlación entre cada pareja de estaciones, exigiendo un mínimo de 3 años (36 datos) en común. Después, cada dato mensual ausente se estimó como promedio ponderado de las 3 estaciones con mejor coeficiente de determinación con la estación problema (empleando este coeficiente como factor de ponderación).

Con las series completadas, se calcularon sus promedios, obteniendo así medias mensuales de temperaturas máximas y mínimas (diarias y mensuales) homogeneizadas para el periodo 1961-80 (GUIJARRO, 1986).

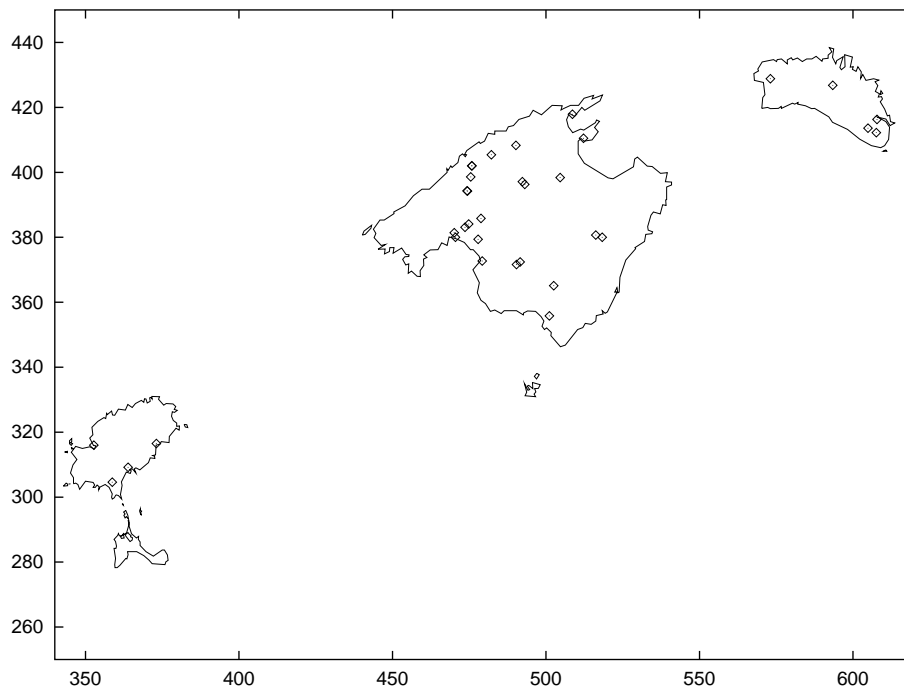


Figura 1.- Distribución de las estaciones termométricas utilizadas.

El siguiente paso fue calcular, para cada estación termométrica, una serie de parámetros fisiográficos (se probaron 32 en total), con objeto de estudiar cómo se ven influenciadas las temperaturas por factores climáticos como la altitud, latitud, pendiente, orientación, irregularidad y convexidad del terreno, apantallamiento por cadenas montañosas y distancia al mar. A estos factores se añadió también el de urbanización, representado por 2 parámetros: % de superficie urbanizada en un entorno de 3 km de diámetro, y distancia mínima desde la estación hasta el límite del casco urbano. A este último se le asignaba el valor cero si la estación estaba situada en campo abierto.

Mediante regresión múltiple se fueron seleccionando los parámetros que ofrecían una mejor explicación de la varianza, hasta obtener las ecuaciones definitivas, que incluyeron 9 parámetros para las temperaturas máximas y 7 para las mínimas. Los coeficientes de determinación múltiple, equivalentes a la fracción de varianza explicada, fueron de 0,71 a 0,88 para las ecuaciones de las temperaturas máximas mensuales medias, de 0,82 a 0,96 para las de las máximas diarias medias, de 0,88 a 0,92 para las mínimas diarias medias, y de 0,86 a 0,90 para las mínimas mensuales medias.

De los 2 parámetros representativos del urbanismo, únicamente resultó significativa la influencia de la *Distancia al Límite Urbano* (DLU en adelante). Este parámetro adoptó el siguiente rango de valores en las 34 estaciones objeto de estudio:

DLU (Hectómetros)	0,0	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0
Nº de estaciones	15	4	7	0	4	1	2	0	1

La importancia de este parámetro en relación con las temperaturas se puede valorar por medio de los coeficientes parciales de regresión que aparecen en la siguiente tabla (expresados en °C/km), para cada una de las variables termométricas estudiadas (TMM=máximas mensuales; TMD=máximas diarias; TmD=mínimas diarias; TmM=mínimas mensuales):

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
TMM	-4,3 ***	-4,5 ***	-2,6 **	-2,1 *	-2,9 **	-1,8	-2,1	-2,5	-2,6 *	-2,5 *	-3,7 ***	-4,3 ***
TMD	-2,6 ***	-2,5 ***	-1,6	-1,5	-2,0 *	-2,0 *	-2,4 *	-2,4 *	-2,1 *	-2,8 ***	-3,2 ***	-2,8 ***
TmD	5,4 ***	5,4 ***	5,5 ***	5,4 ***	5,7 ***	5,9 ***	6,0 ***	5,5 ***	5,0 ***	4,6 ***	5,0 ***	4,9 ***
TmM	7,2 ***	8,1 ***	7,9 ***	8,6 ***	8,8 ***	8,2 ***	8,1 ***	8,3 ***	7,5 ***	7,4 ***	7,8 ***	7,1 ***

Debajo de cada valor se indica, con 1, 2 o 3 asteriscos, cuándo el coeficiente de regresión parcial era significativo al nivel de 0,10, 0,05 o 0,01 respectivamente. Vemos así que la máxima significación se alcanza en las ecuaciones explicativas de las temperaturas máximas invernales, así como en las mínimas de todo el año. Los gradientes medios obtenidos son de alrededor de -4 °C/km en los 20 días (1 por año) más cálidos de los meses de noviembre a febrero de 1961-80, y de unos -2,5 °C/km cuando se consideran todos los días. En el caso de las mínimas los gradientes, con signo contrario como era de esperar, presentan valores de 5 a 6 °C/km en el conjunto de todas las mínimas diarias (con pocas variaciones de unos meses a otros), y alcanzan alrededor de 8 °C/km cuando sólo consideramos las 20 madrugadas más frías de cada mes (una por año).

Estos valores concuerdan con los reseñados en otros trabajos. De los mapas reproducidos en algunas de las referencias bibliográficas citadas se pueden obtener (aunque referidos a noches concretas) gradientes de 1 a 1,5 °C/km en Barcelona, unos 2 °C/km en Igualada, y hasta 10 °C/km en Molins de Rei (MARTIN-VIDE, 1992), así como alrededor de 5 °C/km en Santa Cruz de Tenerife (DORTA et al., 1992). En estos ejemplos se observa la tendencia general a una disminución de los gradientes termométricos de la isla de calor en las ciudades grandes respecto a las pequeñas. Esto ya fue observado por DUCKWORTH y SANDBERG (1954) en California, donde encontraron gradientes de aproximadamente 3,5 °C/km en Palo Alto, 1,7 °C/km en San José, y 1 °C/km en San Francisco.

En la figura 2 se puede observar gráficamente la dependencia de dos de las temperaturas medias mensuales (máximas mensuales de diciembre y mínimas mensuales de agosto) respecto de DLU, una vez descontada la influencia de los demás parámetros. A pesar de la dispersión debida a la varianza no explicada, se aprecia claramente la

relación inversa en el caso de las máximas, y directa en las mínimas. Esta dependencia hubiera sido más difícil de observar en una regresión simple, pues los otros factores la hubieran enmascarado en mayor o menor medida.

También se observa, en ambos casos, que para valores más altos de DLU la pendiente tiende a anularse. Esto está en consonancia con el menor gradiente asociado a ciudades de mayor tamaño, así como con el efecto *meseta* en la distribución de las isotermas de la isla de calor descrito por DUCKWORTH y SANDBERG (op. cit.) para San Francisco y MARTIN-VIDE (op. cit.) para Barcelona. Como se ve en la figura, este efecto meseta sería extensible también a lo que, en temperaturas máximas, podríamos denominar *isla de frescor*.

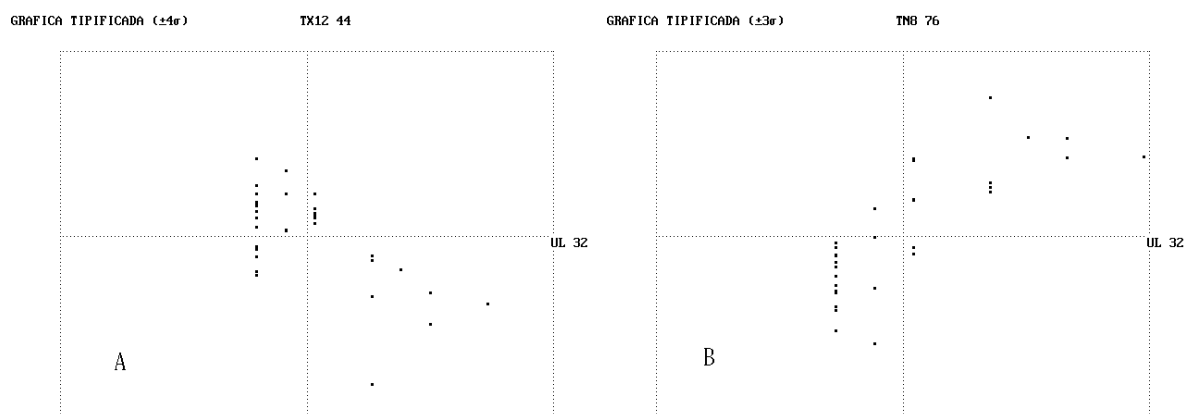


Figura 2.- Dependencia de las temperaturas máximas mensuales medias de diciembre (A) y mínimas mensuales medias de agosto (B) respecto de la *Distancia al Límite Urbano*, una vez eliminada la influencia de otros factores.

Así pues, la inclusión del factor *Distancia al Límite Urbano* permitió establecer cuantitativamente la influencia de la urbanización en las medias climatológicas de temperaturas máximas y mínimas. Para la confección de la cartografía se eliminó este término de las ecuaciones, con lo que se obtuvieron mapas mensuales de temperaturas a escala mesoclimática (con una resolución de 1 km²), referidas a condiciones de *campo abierto*, es decir, sin influencia urbana. (Ni de otros microclimas como el de bosque, puesto que ninguna estación de la red termométrica de Baleares se halla ubicada en uno; si algún usuario de estos mapas desea estimar con ellos las temperaturas medias de alguna ubicación urbana o boscosa, habrá de aplicar la corrección oportuna).

3. El factor urbanización en la evolución de las temperaturas medias mensuales de Palma de Mallorca

En este caso estudiaremos la influencia de este factor en la serie temporal de Palma de Mallorca, y para ello nos apoyaremos en una serie vecina que cabe suponer libre de dicho efecto: la del aeropuerto de Palma, a unos 7 km del centro de la capital. Dado que esta última serie comienza en 1961, y que no hay ninguna otra estación próxima que pueda servir como referencia, restringiremos el análisis temporal al periodo 1961-96. (La serie anual completa, desde 1862, ha sido estudiada y homogeneizada con estaciones más lejanas por QUEREDA y MONTON, 1994, y MONTON y QUEREDA, 1997). El problema es que ambas han sufrido cambios de emplazamiento: el observatorio del aeropuerto se trasladó, en agosto de 1972, de las proximidades de la terminal a la cabecera de pista, 1,4 km más hacia el interior. Y el observatorio de Palma, que desde 1939 estaba situado en la Jefatura de Aviación, dentro del casco urbano (aunque no en el centro), a partir de febrero de 1978 tiene ubicadas sus instalaciones en un muelle de la zona sudoccidental del puerto, denominada Portopí.

Si se representan gráficamente las series mensuales de temperaturas máximas y mínimas medias de Palma, se observan evoluciones muy irregulares, con escasa correspondencia de unos meses a otros. En temperaturas mínimas se aprecia una tendencia ascendente, pero no demasiado clara. Si representamos las desviaciones (de cada término respecto del promedio de la serie) acumuladas, se ponen mejor de manifiesto los cambios de emplazamiento. (Véase, por ejemplo, el caso de la serie de las máximas de diciembre en la figura 3).

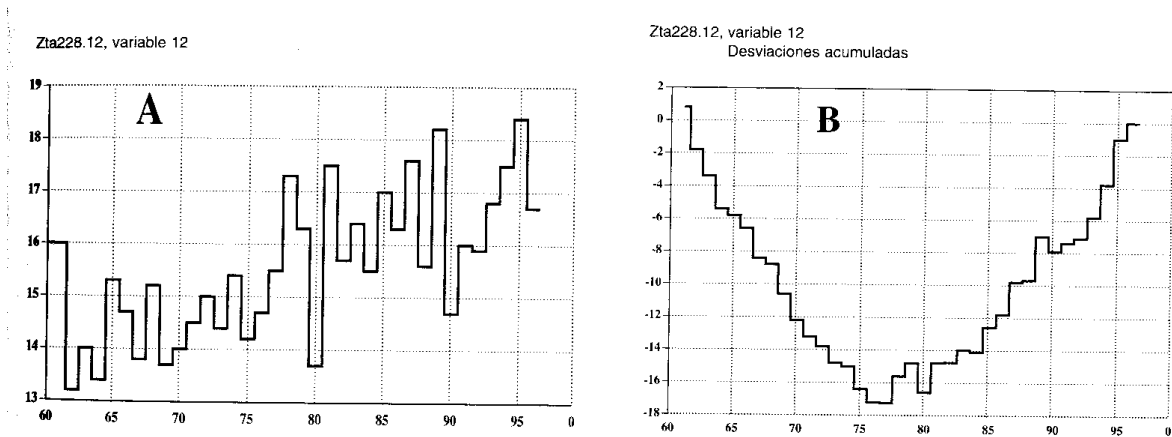


Figura 3.- Serie de temperaturas máximas medias de diciembre en Palma. A) Datos originales. B) Desviaciones acumuladas.

Con las series del aeropuerto sucede algo similar. En las máximas no se aprecia bien el cambio. En las mínimas aparece con más claridad una cierta disminución en la cabecera de pista, más patente en las gráficas de desviaciones acumuladas. Se decide entonces aplicar una corrección a los términos anteriores al cambio, de forma individualizada para cada serie mensual, consistente en restar a dichos términos la diferencia entre una media ponderada de los 10 primeros términos del nuevo emplazamiento y los 10 últimos del anterior. La ponderación se ha hecho linealmente, aplicando un peso igual a 10 para los términos más próximos al cambio, y disminuyendo una unidad en cada término adyacente. Estas correcciones han adoptado los siguientes valores (para temperaturas máximas y mínimas del aeropuerto, A, y Palma, P, en °C):

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
A.Máx	0.4	-0.1	0.5	-0.6	0.8	1.6	0.7	0.1	-0.6	-1.8	-0.3	0.9
A.Mín	-1.7	-1.1	-1.7	-3.0	-2.1	-1.1	-1.6	-2.0	-1.7	-2.3	-2.3	-0.8
P.Máx	0.9	0.3	-0.1	-0.9	-1.4	-0.9	-1.5	-1.4	-0.4	1.3	1.5	1.4
P.Mín	0.0	0.0	0.2	0.1	-0.6	0.0	-0.5	-0.2	0.6	0.6	0.4	-0.1

Se observa cómo las diferencias en temperaturas máximas son pequeñas, y de distinto signo de unos meses a otros. Las mínimas sí que son siempre menores en cabecera de pista, aunque con distinta magnitud. Las series de Palma no se han corregido, pero se ofrecen en la tabla los valores que se obtendrían por el mismo procedimiento, a efectos de comparación. Así vemos como en Portopí las máximas son más altas en invierno y más bajas en verano, lo que se corresponde con su mayor influencia marítima. En las mínimas, por el contrario, parece como si esta influencia se viera compensada por la mayor lejanía al centro urbano.

Una vez corregidas las series del aeropuerto se procedió a formar las series de diferencias Palma-Aeropuerto. Su representación gráfica nos muestra un comportamiento bastante similar para las temperaturas máximas y para las mínimas: en la época más fría del año, de noviembre a marzo, hay un aumento de las diferencias (aumento del efecto *isla de calor*) en Palma Jefatura; después se observa el cambio brusco debido al traslado a Portopí; y finalmente se da un nuevo aumento, pero más suave que el primero.

Como ejemplo podemos ver en la figura 4 la evolución de las diferencias de máximas y mínimas medias de diciembre: Las máximas de Palma aumentan su diferencia con las del aeropuerto a razón de 0,09 °C/año en Jefatura, y sólo 0,02 °C/año en Portopí; las mínimas lo hacían a un ritmo de 0,18 °C/año en Jefatura, que después se ve reducido a 0,05 °C/año. Este menor aumento de las diferencias en Portopí se puede interpretar como un resultado de la menor influencia del crecimiento urbano en el nuevo emplazamiento. (Mientras tanto el consumo de energía eléctrica en el municipio de Palma, según datos del periodo 1968-94 facilitados por GESA, ha aumentado de forma bastante constante, desde 207 hasta 875 MWH).

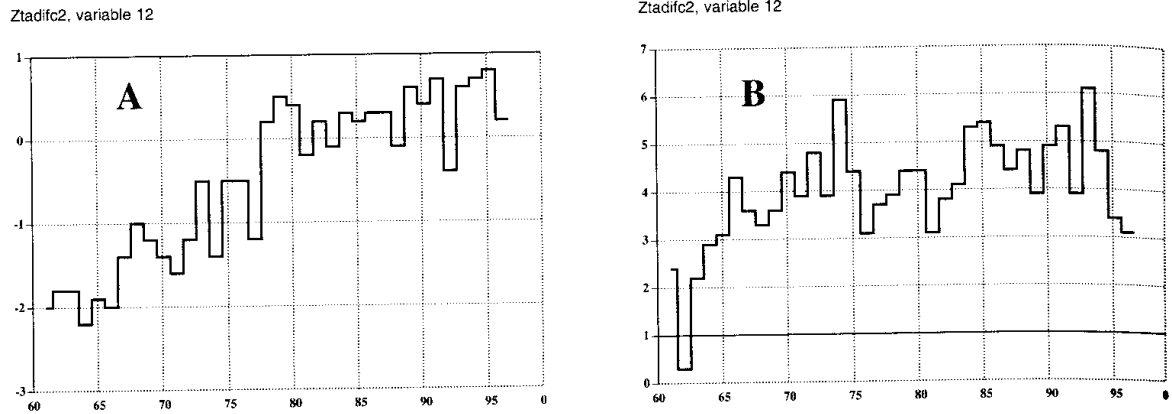


Figura 4.- Series de diferencias Palma-Aeropuerto del mes de diciembre: A) temperaturas máximas medias; B) temperaturas mínimas medias.

Sin embargo, en el resto del año las series de diferencias tienen un comportamiento más irregular; si bien sigue observándose una tendencia a aumentar a lo largo del tiempo, en los años 70 se aprecia una disminución de difícil explicación. (Ver el caso de las máximas de junio en la figura 5).

Se ha probado a correlacionar las diferencias Palma-aeropuerto con los valores mensuales medios de insolación relativa, velocidad del viento, y las propias temperaturas máximas y mínimas del aeropuerto (cuya diferencia aumentará con valores bajos de nubosidad y viento). Se obtuvieron coeficientes de correlación múltiple de entre 0,4 y 0,8, pero las series de los residuos obtenidos no ha permitido una interpretación mejor que la realizada con las diferencias.

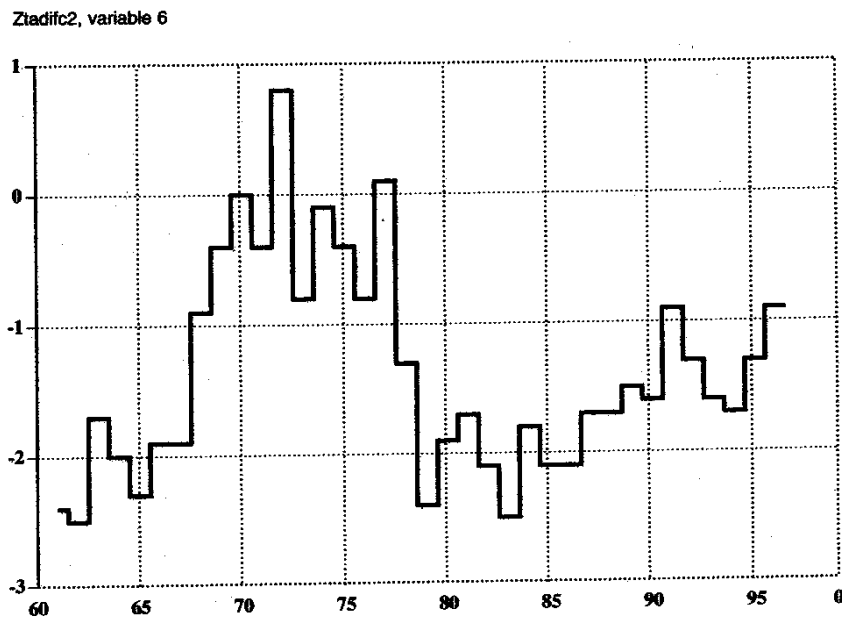


Figura 5.- Serie de diferencias Palma-Aeropuerto de temperaturas máximas medias del mes de junio.

4. Conclusión

La urbanización afecta pues a las series termométricas, tanto en su evolución temporal como en su distribución espacial, y una correcta evaluación de este factor ha de conducir a una mejora en los resultados de los estudios climatológicos en los que interviene la temperatura.

No obstante, aislar la contribución de este efecto del resto de los factores que afectan a la temperatura no es tarea fácil. En este trabajo las mayores dificultades se han encontrado en el análisis de las series temporales de Palma, debido a los cambios de emplazamiento tanto de la serie estudiada como de la que servía de referencia, así como a la complejidad añadida de la distinta influencia marítima en ambas ubicaciones.

Bibliografía

DORTA, P.; MARZOL, V. y RODRIGUEZ, J (1992): Estudio del clima urbano de una ciudad del litoral. El caso de Sta. Cruz de Tenerife (I.Canarias). *Energia, medi ambient i edificació*, (VI Trobades Científiques de la Mediterrània, Maó 1990), Col.lecció Actes, CIRIT (Generalitat de Catalunya), 14:69-89.

DUCKWORTH, F.S. y SANDBERG, J.S. (1954): The effect of cities upon horizontal and vertical temperature gradients. *Bull. Am. Met. Soc.*, 35:198-207.

GARCIA-RUIZ, J.M. et.al. (1989): Organización espacial de las temperaturas en la ciudad de Logroño. *Cuadernos de Investigación Geográfica*, 15:87-98.

GUIJARRO, J.A. (1986): *Contribución a la bioclimatología de Baleares*. Tesis Doctoral, Univ. I. Balears, 282+301 pp (Inédita).

HOWARD, L (1833): *Climate of London deduced from meteorological observations*. 3ª Edición, London, Harvey and Darton.

JONES, P.D.; KELLY, P.M.; GOODESS, C.M. y KARL, T. (1989): The effect of urban warming on the northern hemisphere temperature average. *Jour. Clim.*, 2:285-290.

LOPEZ, A. (1993): *El clima urbano. Teledetección de la isla de calor en Madrid*. MOPT, SEPAMA, Serie Monografías, Madrid, 157 pp.

LOPEZ, A. et al. (1988): *El clima urbano de Madrid: la isla de calor*. Inst. de Economía y Geografía Aplicadas, CSIC, Madrid, 199 pp.

MARTIN-VIDE, J (1992): Avance de resultados sobre la isla de calor de Barcelona y de otras ciudades catalanas. *Energia, medi ambient i edificació*, (VI Trobades Científiques de la Mediterrània, Maó 1990), Col.lecció Actes, CIRIT (Generalitat de Catalunya), 14:55-68.

MONTON, E. y QUEREDA, J (1997): *¿Hacia un cambio climático? La evolución del clima mediterráneo desde el siglo XIX*. Fundación Dávalos-Fletcher, Castellón, 520 pp.

MORENO-GARCIA, M.C. (1994): Intensity and form of the urban heat island in Barcelona. *Inter. Jour. Climatology*, 14:705-710.

PEPPLER, A. (1929): Das Auto als Hilfsmittel der meteorologischen Forschung. *Zeitschrift für angewandte Meteorologie*, 46:305-308.

QUEREDA, J.J. y MONTON, E (1994): Calentamiento significativo en el mediterráneo español (1870-1993). *Cambios y variaciones climáticas en España*. (Actas 1ª Reunión del Grupo de Climatología de la AGE), Univ. de Sevilla/Fundación El Monte, pp.347-360.

RENOU, E. (1862): Différences de température entre Paris et Choisy-le-Roi. *Société Météorologique de France*, Annuaire, 10:105-109.

SCHMIDT, W. (1929): Die Verteilung der Minimum-temperaturen in der Frostnacht des 12 Mai 1927 im Gemeindegebiet von Wien. *Fortschritte der Landwirtschaft*, 2:681-689.