

Influencia del efecto urbano: inhomogeneidad y sistema de conversión de las series de temperatura en Badajoz

Leoncio García-Barrón, M^a Isabel González y Antonio Ramírez

Departamento de Física Aplicada II. Universidad de Sevilla. (leoncio@us.es)

(Recibido: 1-Dic-2004. Publicado: 20-Dic-2004)

Resumen

La modificación de las condiciones ambientales debida a la expansión de las zonas pobladas, o el traslado de un observatorio urbano a un nuevo emplazamiento, puede provocar la inhomogeneidad de las series de registros de las variables meteorológicas. Presentamos el efecto producido en la evolución de los registros de temperaturas a consecuencia del traslado del observatorio de Badajoz desde su emplazamiento en el centro urbano al exterior. Para restituir la calidad de las series elaboramos el sistema de conversión a partir de la estación de la base aérea próxima de Talavera la Real. Se expone la mayor incidencia del efecto urbano en las temperaturas mínimas y se describe el comportamiento mensual del mismo.

Palabras clave: urbanización, traslado de observatorio, temperatura, homogeneidad, Badajoz.

1. Introducción

La fuente de investigación de las series climáticas son los registros de las variables meteorológicas realizados a lo largo de los años. Si las circunstancias durante la época estudiada han obligado a realizar cambios en cuanto a instrumental, procedimiento y/o localización de los aparatos de medida, o el entorno del observatorio ha sufrido modificaciones, la calidad de la serie de observaciones puede verse afectada. Uno de los hechos que produce alteración ambiental, y que consecuentemente da lugar a inhomogeneidades en las series de variables meteorológicas, con pérdida de calidad para el análisis climático, es el cambio de localización del observatorio.

El microclima de las ciudades y las islas de calor generadas en las mismas es un tema que ha merecido la atención de climatólogos y ambientalistas (Landsberg, 1981). En consecuencia se han realizado estudios de isla de calor referidos a las principales capitales españolas. Así, por ejemplo: Madrid (López Gómez *et al.*, 1988; Fernández *et al.*, 2004), Barcelona (Moreno, 1998), Zaragoza (López Martín, 2002), Córdoba (Caballero, 2004), etc. La metodología habitualmente empleada en estos estudios se apoya en el trabajo de campo por la realización de transeptos.

El método alternativo utilizado en esta investigación sobre el efecto urbano se basa en la comparación del comportamiento térmico mediante el análisis de series meteorológicas. El efecto de la urbanización, en relación con la calidad de las series, puede sobrevenir por medio de dos vías complementarias:

- Por modificación de las condiciones ambientales debido a la expansión de las zonas pobladas que llegan a englobar a observatorios inicialmente situados en la periferia de las ciudades,
- Por traslado del observatorio localizado en el centro urbano a un nuevo emplazamiento en el exterior (el sentido opuesto no es frecuente).

Presentamos el efecto de la localización del observatorio en la evolución de las temperaturas de Badajoz.

2. Series meteorológicas de Badajoz

El observatorio de Badajoz, localizado en la zona suroccidental de la Península Ibérica y sometido a la influencia atlántica (38°53' N; 6°58' W), es uno de los más antiguos de España. Inicia sus registros a partir de 1864 aunque de forma regular desde 1875, con la ausencia de 1898, y continúa, con la denominación Badajoz-Instituto, hasta 1984 en que cambia de ubicación y se traslada al recinto universitario.

La homogeneidad de las series térmicas del amplio periodo inicial ha sido favorablemente informada por diversos autores (Almarza *et al.*, 1996). Lamentablemente el traslado en 1984 se efectuó sin que exista periodo de simultaneidad que nos permita relacionar directamente datos correspondientes de ambos observatorios. El I.N.M. les asigna al nuevo emplazamiento el mismo número de código indicativo agregándole únicamente una letra como distintivo (4478G) con lo que da a entender que lo considera continuación del mismo observatorio. El traslado del observatorio del centro a la periferia de la ciudad afecta a la medida de temperaturas. Para garantizar la continuidad de las observaciones debemos establecer, en su caso, el sistema de conversión adecuado a partir de la estación de la base aérea próxima de Talavera la Real de la que poseemos datos termopluiométricos ininterrumpidos homogéneos desde 1955.

Badajoz es una ciudad media (135000 habitantes) situada sobre pequeñas elevaciones en la ribera del Guadiana que en las últimas décadas ha experimentado un incremento de población debido al desarrollo de actividades comerciales y de servicio. El antiguo observatorio meteorológico se localizaba en el Instituto de Enseñanza Media, en el centro de la ciudad histórica. El nuevo observatorio se encuentra en el exterior de la ciudad, en una zona de edificios de baja altura dispersos entre pinares, en la linde de los terrenos agrícolas. La base aérea de Talavera está enclavada a unos quince kilómetros al este, en medio de una amplia vega regable.

3. Análisis de datos termométricos

En primer lugar debemos establecer si es metodológicamente correcto elegir las series de Talavera como base de referencia para el análisis de la homogeneidad relativa de las series de Badajoz. El criterio inicial de aceptación es que exista alta correlación entre los elementos sincrónicos de ambos observatorios.

La tabla 1 recoge los coeficientes de correlación de Pearson para las series termométricas medias mensuales de máximas y de mínimas, durante el periodo de simultaneidad 1955-1983.

Tabla 1: Coeficientes de correlación de las temperaturas máximas y mínimas Badajoz-Talavera (1955/1983).

| | Sep | Oct | Nov | Dic | Ene | Feb | Mar | Abr | May | Jun | Jul | Ago |
|--------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| T.máx. | 0.99 | 0.99 | 0.98 | 0.96 | 0.96 | 0.97 | 0.98 | 0.97 | 0.99 | 0.98 | 0.95 | 0.97 |
| T.mín. | 0.91 | 0.87 | 0.95 | 0.98 | 0.97 | 0.95 | 0.97 | 0.95 | 0.91 | 0.92 | 0.88 | 0.94 |

La gran correspondencia permite utilizar métodos para la extrapolación de la serie interrumpida de Badajoz con el apoyo de los datos de Talavera la Real tanto para las temperaturas mínimas como para las temperaturas máximas.

3.1. Temperaturas mínimas

En la figura 1 se aprecia el paralelismo en la evolución temporal de la temperatura mínima anual entre ambas series. Se observan valores superiores de temperaturas en Badajoz-Instituto a los registrados en Talavera hasta 1984, con un promedio anual de 1,5°C de diferencia de temperaturas. A partir de este año, traslado a Badajoz-Universidad, se invierte bruscamente el signo de la diferencia (- 0,5°C) lo que evidencia la discontinuidad introducida en la homogeneidad de la serie.

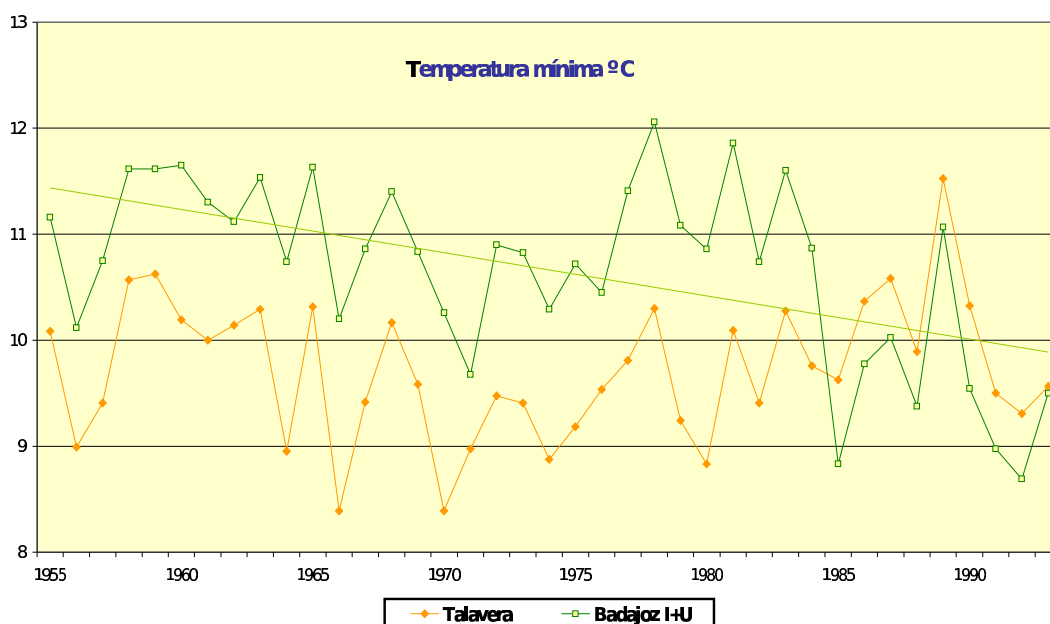


Figura 1: Evolución temporal de las series de temperatura mínima anual de Talavera la Real y de Badajoz (Instituto+Universidad) con la recta de tendencia de ésta y la indicación del traslado.

Además, la tendencia de la serie completa de observaciones reales –denominada Badajoz Instituto+Universidad– presenta pendiente negativa frente al calentamiento generalizado y significativo de las temperaturas mínimas anuales en el suroeste español (García-Barrón, 2004). Fue precisamente este aspecto el que produjo iniciales dudas en los autores acerca de la calidad de los datos y provocó el análisis de las series.

3.2. Temperaturas máximas

Las series temporales de promedios mensuales de temperaturas máximas se someten a un procedimiento analítico similar al de las series de temperaturas mínimas. En la figura 3 se muestran conjuntamente con la representación de la serie de temperaturas anuales máximas de Talavera y de Badajoz (Instituto+Universidad), ésta en línea discontinua desde 1985 (con trazado continuo el tramo correspondiente que representa los valores homogeneizados que posteriormente se trata). Observamos que las diferencias de las temperaturas máximas anuales en el periodo 1955-84 son inferiores a las ya comentadas de temperaturas mínimas, e incluso se produce un aparente cambio de signo hacia 1970 (de $-0,15$ a $+0,05^{\circ}\text{C}$ en promedio). Este cambio de signo no es de magnitud suficiente para considerar una posible inhomogeneidad, sino que aceptamos que es consecuencia de la normal variabilidad espacial de las temperaturas a lo largo del tiempo. Sin embargo, a partir de 1985 la diferencia media de la temperatura máxima registrada en Talavera y en Badajoz-Universidad alcanza $0,7^{\circ}\text{C}$, produciendo un salto relevante.

4. Generación de series homogéneas: Metodología y resultados

La utilización de las series térmicas de Badajoz en estudios climáticos requiere la previa homogeneización. Para ello se han determinado las rectas de regresión por mínimos cuadrados de las temperaturas medias mensuales entre Talavera y Badajoz-Instituto, lo que ha permitido generar una prolongación de tales series mensuales basadas en los datos correspondientes de Talavera. La temperatura anual se obtiene a partir de los pronósticos obtenidos en las correspondientes temperaturas mensuales. Interpretamos que los nuevos valores generados son los que aproximadamente se hubieran medido si no se hubiera realizado el cambio de emplazamiento.

Las series mensuales generadas se someten, a su vez, a un doble criterio de aceptación. En primer lugar, se comprueba que los valores pronosticados mantienen la alta correlación con respecto de los valores medidos en el nuevo emplazamiento. La tabla 2 muestra los respectivos coeficientes de correlación de las temperaturas mínimas mensuales entre los valores calculados de la serie generada y los correspondientes registros de la serie Badajoz-Universidad; son los meses de verano los que presentan menor ajuste y solamente el coeficiente del mes de junio es inferior a 0,9. El coeficiente de correlación de las correspondientes series anuales es 0,97.

Tabla 2: Coeficientes de correlación de temperaturas mínimas entre los valores de la serie generada y los registros del nuevo emplazamiento Badajoz-Universidad.

| | Sep | Oct | Nov | Dic | Ene | Feb | Mar | Abr | May | Jun | Jul | Ago |
|--------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| T.mín. | 0.97 | 0.95 | 0.97 | 0.99 | 0.99 | 0.98 | 0.93 | 0.95 | 0.93 | 0.87 | 0.93 | 0.92 |

Así mismo, se comprueba que la serie completa modificada –formada por la prolongación de la serie de los registros de Badajoz-Instituto con los valores de la serie generada matemáticamente– no da lugar a inhomogeneidades relativas internas (García Barrón, 2001) respecto de las series de registros reales obtenidos en el mismo periodo en Talavera.

Se justifica, por tanto, la aceptación de la serie generada, tanto respecto de las observaciones registradas en el nuevo emplazamiento –cuya homogeneidad se presume considerada aisladamente– como globalmente respecto de la serie de la antigua localización, a su vez, también considerada homogénea.

La figura 2 muestra el comportamiento temporal de las series de temperatura mínima de Badajoz, incluido el periodo ampliado, y la de Talavera para el periodo de simultaneidad.

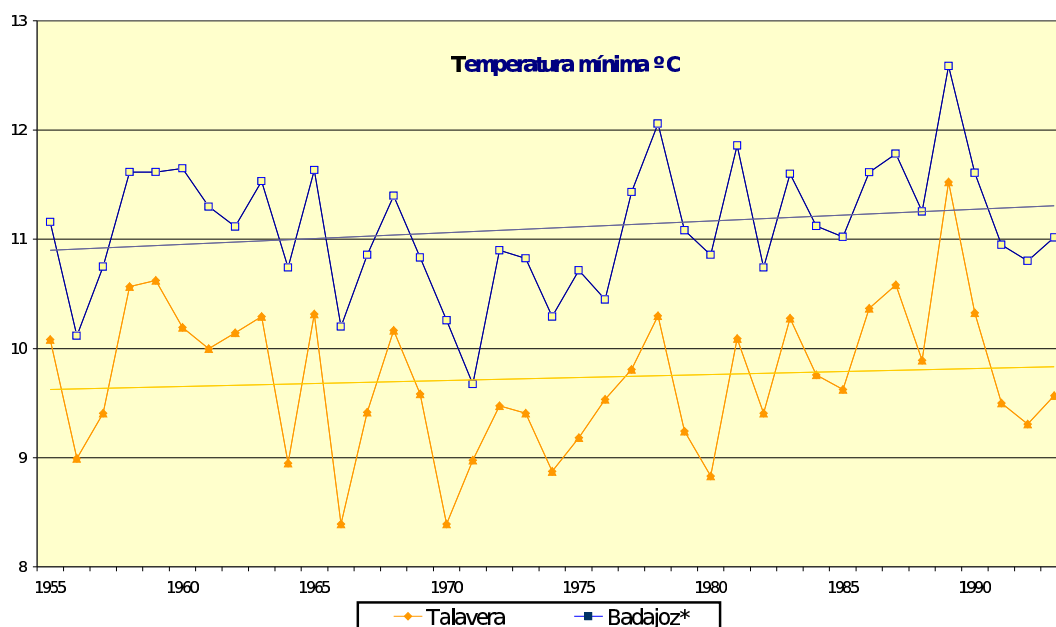


Figura 2: Comparación de la serie de temperatura mínima anual en Talavera la Real y la serie homogeneizada de Badajoz (con las correspondientes rectas de tendencia).

Consideramos que un aspecto interesante en el análisis del efecto urbano, no destacado en la bibliografía, es establecer si la contribución es uniforme a lo largo del año, o se produce con distinta intensidad en los diversos meses. La tabla 3 recoge los promedios mensuales de las diferencias de temperatura entre

los valores homogeneizados de la serie matemáticamente generada y los realmente medidos en el nuevo emplazamiento.

Tabla 3: Promedio de diferencia de temperatura mínimas mensuales entre los valores calculados y los registrados en Badajoz-Universidad.

| | Sep | Oct | Nov | Dic | Ene | Feb | Mar | Abr | May | Jun | Jul | Ago |
|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Dif. | 2,3 | 1,9 | 1,8 | 1,6 | 2,0 | 1,8 | 2,0 | 2,2 | 1,8 | 1,9 | 2,1 | 2,3 |

Aun cuando no se detecta clara distinción estacional, parece ser la época veraniega (prolongada con la inercia térmica de los edificios) aquella en la que el efecto urbano es más pronunciado. Sin embargo, aunque no se produce la plena uniformidad intraanual, al estar todos los valores mensuales en el entorno de 2°C, y dada la variabilidad térmica interanual de la zona, los resultados obtenidos no permiten, en nuestro criterio, alcanzar deducciones concluyentes.

En la figura 3 se expone gráficamente el proceso de transformación de la serie de temperaturas máximas anuales de Badajoz. Hasta 1985 la representación es única y corresponde a la serie original de Badajoz-Instituto, pero a partir de esta fecha se bifurca. El trazado en línea discontinua inferior se refiere a los datos anuales relativos a las medidas efectuadas en la nueva localización de la Universidad. La rama continua superior está construida a partir de los valores homogeneizados. Como elemento de referencia se incluye también la serie de Talavera, lo que permite apreciar la discontinuidad producida en la serie temporal con motivo del traslado y la modificación introducida. Se comprueba que la relevancia del efecto urbano sobre las temperaturas máximas es menor que el anteriormente expuesto sobre las mínimas.

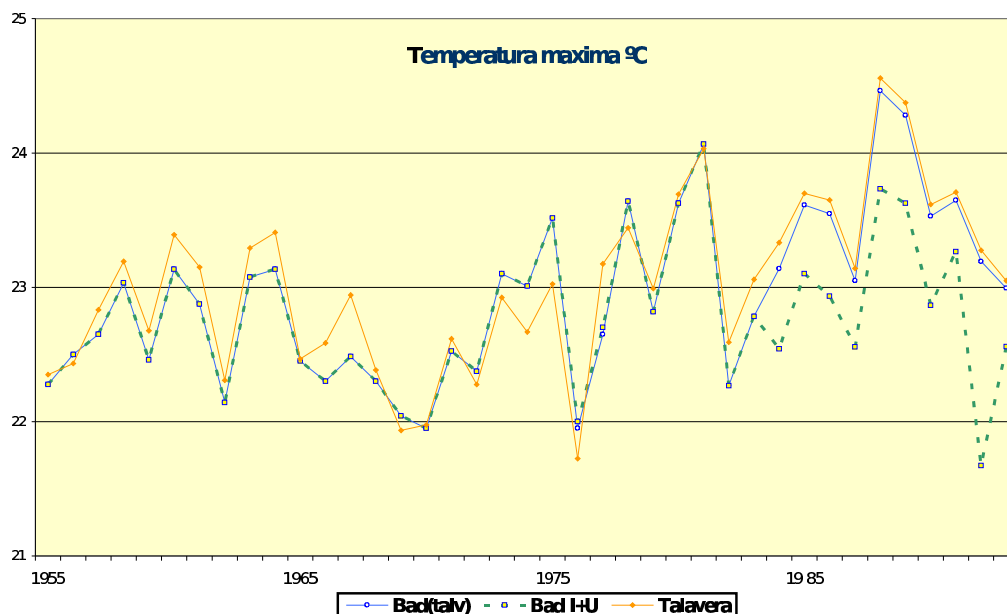


Figura 3: Representación de las series de temperatura máxima anual en Talavera la Real y las series de Badajoz, con representación conjunta de los tramos simultáneos de Badajoz-Universidad y de la ampliación homogeneizada de Badajoz-Instituto.

La diferencia media interanual de la serie generada y la simultánea de Talavera es del orden de $-0,1^{\circ}\text{C}$, análogo al de precisión de los aparatos de medida, lo que provoca la casi coincidencia en la gráfica.

Por su interés para los estudios climáticos incluimos el anexo en que se recogen los valores homogeneizados de las series mensuales de temperatura máxima y mínima del periodo ampliado 1984/1999.

5. Conclusiones

La observación de las figuras precedentes sobre la evolución comparada de las series anuales de temperaturas, con sus correspondientes líneas de tendencia en el caso de las mínimas, expresa claramente el efecto de las islas urbanas de calor. Se detecta que este efecto adquiere mayor relevancia en el caso de las temperaturas mínimas, superior a 2°C, frente a sólo 0,5°C aproximadamente en las máximas.

Además, deja patente, en nuestro criterio, lo adecuado de modificar las series, a partir de los datos de observatorios próximos bien correlacionados, cuando se han producido modificaciones en las condiciones ambientales por cambio de emplazamiento.

Metodológicamente el criterio de calidad requiere la homogeneidad interna de la serie ampliada y la homogeneidad relativa respecto del observatorio de referencia, y de los valores generados respecto de los registros de la nueva localización. La diferencia de valores entre los observados tras el traslado y los correspondientes generados por homogeneización permite cuantificar el efecto urbano. Si bien estas diferencias son ligeramente superiores durante el verano, consideramos que no autorizan a formular deducciones concluyentes acerca de la contribución mensual al efecto analizado.

Efecto análogo al detectado pero de sentido contrario es el que puede producirse si el entorno de un observatorio situado en el exterior de las ciudades se ve progresivamente englobado por nuevas urbanizaciones o instalaciones industriales. Consideramos que bajo estas circunstancias, tras el adecuado análisis, también hay motivo suficiente para alterar los registros meteorológicos debido a la falta de uniformidad climática.

Bibliografía

Almarza C, López Díaz J y Flores C (1996): *Homogeneidad y variabilidad de los registros históricos de precipitación de España*. I.N.M. Serie A, 143.

Caballero E (2004): Microclimas urbanos; la importancia de los materiales. En García Codron JC *et al.* (Eds.), *El clima entre el mar y la montaña*. Publicaciones de la Asociación Española de Climatología, Serie A nº 4, pp. 571-581.

Fernández F, Montávez JP, González-Rouco JF y Valero F (2004): Relación entre la estructura espacial de la isla térmica y la morfología urbana de Madrid. En García Codron JC *et al.* (Eds.), *El clima entre el mar y la montaña*. Publicaciones de la Asociación Española de Climatología, Serie A nº 4, pp. 641-650.

García Barrón L y Pita MF (2001): Propuesta metodológica para determinación de inhomogeneidades relativas en las series de observaciones. En Pérez-Cueva AJ *et al.* (Eds.), *El tiempo del clima*. Publicaciones de la Asociación Española de Climatología. Serie A nº 2, pp. 87-94.

García Barrón L y Moreno H (2003): La comodidad térmica, un factor determinante en la adecuación energética de los edificios. En *Reflexiones y experiencias sobre gestión energética a nivel local*. Agencia de la Energía de Sevilla.

García Barrón L y Pita MF (2004): Stochastic analysis of time series of temperatures in the south-west of the Iberian Peninsula. *Atmosfera*, 17:225-244.

Landsberg HE (1981): *The urban climate*. Academic Press. Nueva York.

López Gómez *et al.* (1988): *El clima urbano de Madrid: la isla de calor*. Instituto de Economía y Geografía Aplicada. CSIC.

López Martín F (2002): *El clima en el medio ambiente urbano de Zaragoza*. Tesis doctoral. Universidad de Zaragoza.

Moreno García MC (1998): *Estudio del clima urbano de Barcelona: la "isla de calor"*. Tesis doctoral. Universidad de Barcelona.

ANEXO

| Temperatura mínima (°C) | | | | | | | | | | | | | |
|-------------------------|------|------|------|------|-----|-----|-----|------|------|------|------|------|-------|
| Badajoz | Sep | Oct | Nov | Dic | Ene | Feb | Mar | Abr | May | Jun | Jul | Ago | Anual |
| 1984/85 | 16,2 | 11,6 | 9,3 | 6,6 | 3,8 | 8,6 | 6,2 | 9,4 | 10,8 | 16,0 | 17,9 | 16,8 | 11,1 |
| 1985/86 | 17,5 | 11,7 | 8,0 | 6,2 | 4,7 | 6,8 | 7,1 | 6,9 | 13,1 | 15,5 | 18,5 | 17,0 | 11,0 |
| 1986/87 | 18,1 | 13,7 | 7,4 | 4,7 | 4,7 | 6,3 | 7,7 | 10,9 | 12,6 | 16,2 | 19,2 | 19,5 | 11,6 |
| 1987/88 | 19,1 | 12,7 | 8,0 | 8,8 | 7,5 | 5,8 | 6,7 | 10,4 | 12,6 | 16,0 | 17,9 | 17,1 | 11,8 |
| 1988/89 | 15,3 | 13,3 | 9,9 | 2,4 | 2,4 | 5,5 | 7,5 | 9,4 | 14,2 | 17,0 | 20,6 | 19,2 | 11,3 |
| 1989/90 | 16,7 | 14,1 | 11,0 | 10,1 | 5,1 | 7,7 | 8,1 | 9,6 | 13,9 | 16,5 | 20,3 | 19,9 | 12,6 |
| 1990/91 | 18,8 | 13,5 | 7,8 | 5,6 | 4,3 | 5,2 | 8,8 | 8,6 | 11,8 | 17,2 | 19,8 | 20,2 | 11,6 |
| 1991/92 | 18,5 | 11,5 | 7,5 | 5,5 | 2,4 | 3,7 | 7,1 | 9,8 | 14,2 | 14,8 | 19,4 | 19,1 | 10,9 |
| 1992/93 | 14,7 | 11,9 | 8,3 | 6,6 | 1,7 | 4,4 | 7,7 | 9,2 | 12,0 | 16,4 | 18,7 | 18,3 | 10,8 |
| 1993/94 | 15,5 | 11,8 | 8,2 | 6,0 | 4,4 | 4,8 | 8,3 | 8,4 | 13,1 | 16,5 | 17,6 | 18,2 | 11,0 |
| 1994/95 | 14,5 | 13,9 | 9,0 | 5,6 | 4,9 | 6,7 | 7,2 | 10,0 | 15,2 | 17,6 | 19,8 | 20,0 | 11,9 |
| 1995/96 | 15,5 | 14,0 | 11,8 | 9,0 | 8,3 | 5,4 | 8,0 | 10,5 | 13,3 | 17,3 | 18,9 | 17,7 | 12,4 |
| 1996/97 | 15,9 | 12,3 | 8,9 | 7,7 | 6,2 | 7,1 | 7,7 | 11,9 | 13,8 | 15,5 | 19,0 | 19,2 | 12,0 |
| 1997/98 | 18,7 | 14,4 | 10,9 | 8,0 | 6,9 | 7,9 | 7,8 | 9,8 | 13,8 | 16,4 | 19,5 | 20,3 | 12,7 |
| 1998/99 | 17,6 | 10,5 | 7,6 | 1,0 | 2,7 | 2,8 | 7,7 | 10,5 | 13,9 | 16,7 | 19,2 | 18,2 | 10,7 |

| Temperatura máxima (°C) | | | | | | | | | | | | | |
|-------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|
| Badajoz | Sep | Oct | Nov | Dic | Ene | Feb | Mar | Abr | May | Jun | Jul | Ago | Anual |
| 1984/85 | 31,0 | 23,7 | 17,1 | 14,0 | 12,7 | 17,2 | 17,9 | 21,4 | 23,3 | 30,4 | 34,4 | 34,7 | 23,1 |
| 1985/86 | 34,1 | 27,7 | 17,8 | 14,3 | 12,7 | 14,2 | 18,3 | 17,5 | 27,6 | 31,2 | 35,4 | 32,4 | 23,6 |
| 1986/87 | 28,8 | 24,5 | 18,4 | 14,6 | 12,9 | 15,3 | 20,6 | 21,7 | 26,7 | 31,7 | 33,3 | 34,1 | 23,5 |
| 1987/88 | 33,9 | 20,9 | 17,5 | 15,2 | 14,4 | 15,4 | 20,5 | 20,8 | 23,7 | 26,9 | 32,8 | 34,7 | 23,0 |
| 1988/89 | 33,0 | 24,8 | 18,3 | 14,4 | 14,9 | 17,2 | 21,6 | 19,0 | 27,3 | 32,2 | 36,8 | 34,1 | 24,5 |
| 1989/90 | 30,4 | 25,6 | 18,5 | 15,5 | 14,0 | 17,5 | 20,3 | 19,9 | 27,3 | 30,7 | 36,0 | 35,8 | 24,3 |
| 1990/91 | 31,6 | 22,9 | 17,6 | 13,1 | 13,7 | 13,4 | 17,5 | 21,2 | 27,7 | 32,7 | 35,1 | 35,7 | 23,5 |
| 1991/92 | 31,2 | 21,5 | 17,9 | 13,9 | 12,1 | 16,1 | 21,6 | 23,7 | 28,8 | 26,7 | 35,6 | 34,7 | 23,6 |
| 1992/93 | 30,7 | 21,2 | 19,8 | 14,7 | 14,5 | 16,6 | 19,8 | 20,2 | 22,1 | 29,4 | 35,7 | 33,7 | 23,2 |
| 1993/94 | 26,7 | 19,8 | 16,4 | 13,0 | 14,0 | 15,0 | 22,4 | 21,9 | 24,7 | 31,9 | 35,2 | 34,7 | 23,0 |
| 1994/95 | 28,5 | 23,9 | 19,9 | 15,4 | 15,5 | 17,6 | 21,2 | 24,9 | 29,0 | 31,4 | 35,1 | 35,7 | 24,8 |
| 1995/96 | 28,1 | 27,3 | 19,4 | 15,3 | 13,7 | 14,0 | 18,7 | 22,2 | 24,2 | 32,5 | 34,3 | 32,2 | 23,5 |
| 1996/97 | 27,7 | 24,4 | 18,4 | 14,4 | 13,6 | 18,4 | 25,2 | 25,1 | 24,5 | 27,0 | 32,0 | 33,0 | 23,7 |
| 1997/98 | 31,1 | 25,0 | 17,8 | 14,8 | 14,0 | 17,9 | 22,3 | 19,5 | 24,4 | 31,0 | 35,1 | 35,9 | 24,1 |
| 1998/99 | 29,2 | 24,1 | 25,3 | 14,4 | 13,4 | 16,8 | 19,9 | 23,5 | 26,3 | 32,2 | 35,7 | 34,2 | 24,6 |

