

La aplicación del análisis de Fourier al establecimiento de contrastes térmicos urbano-rurales

por M. BRUNET INDIA*
y A. CORONAS SALCEDO**

Palabras clave:

análisis de Fourier; diferencias térmicas urbano-rurales; función temporal anual tipo; Tarragona; tendencias temporales.

En el marco de una hipótesis ondulatoria determinista, el tratamiento de series temporales mediante la aplicación del análisis de Fourier constituye una técnica matemática que ha sido utilizada en múltiples y diversos campos. Desde el campo de la economía y su relación con los fenómenos meteorológicos (Álvarez, N. 1986; Beveridge, W. 1922, Nerlove, M. Grether, D.M. y Carvalho, J.L. 1979), al del análisis de series hidrológicas y de calidad de aguas (Adamowski, K. 1971; Baldasano, J.M. 1983; Long, L.L. 1976; o Thoman, R.V. 1967), se ha comprobado la validez del mismo en el tratamiento de fenómenos oscilatorios, aunque éstos no sean de raíz física.

Más fecunda, si cabe aún, ha sido su aplicación al campo del análisis de las series climatológicas para el conjunto de elementos que sufren oscilaciones periódicas. En este sentido, han de señalarse los trabajos sobre radiación solar (Baldasano, J.M. y Coronas, A. 1981; Balling, R.C. 1982; Balling, R.C. y Cervený, R.S. 1982; o Egido, M., Yuste, J.M., Garmendia, J. y Seco, J. 1980), sobre la temperatura del aire (Coronas, A. y Baldasano, J.M. 1984; Pérez, J. y Núñez, J.M. 1974, etc.), sobre la marea solar atmosférica (Núñez, J.M. y Pérez, J. 1975), sobre la relación entre insolación y nubosidad (Pérez, J. y Núñez, J.M. 1976), sobre los ciclos pluviométricos (Hsu, C.F. y Wallace, J.M. 1976) o más recientemente su aplicación al desarrollo de un método diseñado para identificar las regiones del planeta que tienen respuestas termo-pluviométricas asociadas con el ENOA (Ropelewsky, C.F. y Halpert, M.S. 1986).

En el campo de la evaluación empírica de los efectos climáticos inducidos por la urbanización, esta técnica puede utilizarse con éxito para establecer el distinto comportamiento urbano-rural en aquellas variables que presentan oscilaciones periódicas significativas, como es el caso de las temperaturas (Brunet, M. 1989).

*Profesora titular de Geografía física. Universitat Rovira i Virgili, Tarragona.

**Profesor titular de Física Aplicada. Universitat Rovira i Virgili, Tarragona.

Por otra parte y de forma generalizada entre los estudiosos de la Climatología Urbana, se viene utilizando para evaluar las diferencias climáticas urbano-rurales una de las aproximaciones propuestas por W.P. Lowry, consistente en comparar las series climatológicas correspondientes a dos observatorios representativos de condiciones urbanas y no urbanas, para establecer con ello las diferencias actuales entre los dos medios. Normalmente, se escoge una estación meteorológica localizada en el interior del área urbana, a la que cabe presuponer se halle afectada por las condiciones climáticas que la ciudad determina, y otra estación situada en las afueras de la ciudad, frecuentemente ubicada en un aeropuerto, que estará, por tanto, exenta de exhibir dichas influencias (Lowry, W.P. 1977: 132).

Como es sabido, los patrones térmicos horizontales y verticales sobre las áreas urbanas se hallan notablemente modificados, respecto de aquellos que caracterizan a las áreas naturales, rurales o simplemente a la periferia no urbanizada de las ciudades. Estos cambios pueden observarse tanto en las grandes áreas urbanas, en las que alcanzan su máxima expresión, como en las ciudades de tipo pequeño y medio, en las que éste constituye el cambio microclimático más representativo (Landsberg, H.E. 1981: 83). Ello está motivado por el hecho de que las ciudades originan importantes transformaciones del espacio natural, al modificar las características de la cubierta natural e introducir nuevas estructuras y materiales. Las superficies y estructuras urbanas determinan alteraciones notables en el conjunto de términos integrantes del balance de radiación y de calor, que, en definitiva, rigen el comportamiento térmico de estas áreas.

Los sectores asfaltados y pavimentados, las paredes externas y los tejados de los edificios y otras construcciones, a diferencia de la cubierta agraria o natural, se comportan como superficies de reflexión múltiple de la radiación solar incidente, al absorber parte de la recibida y reflejar y emitir la restante hacia otras superficies absorbentes y reflectantes. Además, los materiales urbanos conducen mejor el calor que la cubierta vegetal del campo y tienen una mayor capacidad de absorber y almacenar energía calorífica (Landsberg, H. E. 1970: 130). En definitiva, los cambios en el albedo, en la conductividad y capacidad calorífica de los materiales urbanos, junto a la emisión de calor derivada de las actividades humanas determinan que las ciudades presenten temperaturas, en general, más elevadas que las de sus propios e inmediatos alrededores. Esta modificación en los patrones térmicos es conocido como el efecto de *isla de calor urbana*, puesto en evidencia en numerosas investigaciones (Mitchell, J.M. Jr. 1961; Ludwig, F.L. 1970; Oke, T.R. 1973; o Sekiguti, T. 1970, entre otros destacados científicos).

Así, en el marco teórico de la Climatología Urbana, en concreto en el campo específico de la estimación empírica de los efectos de la urbanización sobre el clima, se inscribe la presente aportación, que tiene por finalidad evaluar y establecer el distinto comportamiento térmico existente entre la ciudad de Tarragona y su periferia no urbanizada, mediante la aplicación del análisis armónico a las series termométricas representativas de ambos medios. Asimismo, se pretende evidenciar inicialmente la influencia que el reciente crecimiento urbano-industrial de la ciudad de Tarragona ha podido generar en su régimen térmico, para lo cual se modelizarán y contrastarán para ambos observatorios el conjunto de años iniciales en los que no se había verificado dicho crecimiento y otro grupo de años finales de las series utilizadas en los que cabe esperar quedarán recogidos los efectos térmicos de la expansión urbanística e industrial de la ciudad.

LA DESCRIPCIÓN DEL MÉTODO, LAS FUENTES E INFORMACIÓN UTILIZADAS

Para conocer en profundidad el comportamiento térmico anual de los observatorios representativos de los dos medios estudiados, se ha aplicado el análisis de Fourier al tratamiento de las series térmicas correspondientes a la estación meteorológica de la ciudad de

Tarragona y a la instalada en la Base Aérea de Reus, a ocho kilómetros al oeste de dicha ciudad. La aplicación de esta técnica a parámetros climatológicos reviste un especial interés en el caso de las temperaturas, ya que éstas configuran una ingente cantidad de información numérica facilitada en forma de valores horarios —registros a las 7 h, 13 h y 18 horas— y diarios —máxima, mínima y media— de difícil e incómodo tratamiento, por ello, su interés reside en la modelización de estos datos, quedando reducido todo el paquete a expresiones trigonométricas.

En efecto, la virtualidad de esta técnica, en comparación con el uso de las simples medias aritméticas para establecer el régimen térmico, estriba en la posibilidad de reducir los numerosos datos a una ecuación anual, que permite utilizarlos e interpretarlos de forma más sencilla y exacta. Para ello, los registros son reducidos año a año a su correspondiente expresión matemática y, a partir de ellas, se calcula la *función temporal anual tipo* representativa del comportamiento más probable que puede adquirir una variable en cualquier día del año, independientemente ya, una vez establecida de la longitud de la serie histórica utilizada (Baldasano, J.M. y Cremades, L. 1988: 67).

En definitiva, el análisis de Fourier permite, por una parte, detectar y aislar los años no representativos del comportamiento, en este caso térmico, de un observatorio y, por otra, disponer de la ecuación característica de la *función temporal anual tipo*, que calcula el valor más probable de la temperatura del aire en cualquier día del año sobre un lugar determinado.

Por otro lado, en diversas investigaciones climáticas en las que se ha aplicado este método al análisis de series temporales que presentan oscilaciones o frecuencias anuales reconocibles, se ha confirmado en todos los casos que la modelización puede reducirse al armónico principal, que contribuye de manera determinante y casi exclusiva al establecimiento del año tipo. En esta clase de estudios el armónico principal retiene la mayor varianza al ser la del resto de armónicos no significativa (Coronas, A. y Baldasano, J.M. 1984: 479-484).

Las fases de desarrollo del método comprenden fundamentalmente dos etapas. En la primera, se aplica el análisis de Fourier a cada uno de los años que componen la serie, lo que permite eludir los fenómenos aleatorios y obtener una ecuación representativa de cada uno de ellos. Ésta viene definida por los armónicos existentes en función de la varianza explicada por los mismos, que, como se ha dicho, queda retenida en su máximo porcentaje en el armónico principal, que define el anual. Por otra parte, en esta fase se establecen las discrepancias que puedan existir en el comportamiento de algunos años respecto a los restantes y eliminar, por tanto, los inadecuados, reduciendo con ello el tiempo de cálculo.

El procedimiento en esta etapa, en términos generales, sigue los pasos que serán expuestos a continuación, según el desarrollo efectuado por A. Coronas y J.M. Baldasano (1984). Como es sabido, las variables climatológicas quedan divididas en dos componentes, uno determinista y otro aleatorio, dependientes del tiempo:

$$X_{(i)} = XT_{(i)} + XF_{(i)} + XA_{(i)}, \quad i = 1, \dots, N$$

donde $X_{(i)}$ es la observación en un instante de tiempo, $XT_{(i)}$ es la tendencia del componente determinista, $XF_{(i)}$ es la frecuencia del componente determinista y $XA_{(i)}$ es el componente aleatorio, correspondiendo el instante i a una hora o día determinado, para un total de N observaciones.

El término $XT_{(i)}$ corresponde al promedio de las N observaciones, siendo:

$$XT_{(i)} = XM = \sum_{i=1}^N X_{(i)} / N$$

En las series temporales que tienen frecuencias o armónicos significativos, la aplicación del análisis de Fourier, basado en la superposición de senos y cosenos de frecuencias múltiplos de la principal, permite la separación de los componentes cíclicos principales respecto de los armónicos secundarios. La frecuencia principal viene definida por $1/N$ y las otras son múltiplos de esta f/N . La componente determinista $XD_{(i)}$, puede expresarse como la suma de uno o más armónicos, dependiendo de su convergencia:

$$XD_{(i)} = XM + \sum_{K=1}^m \left(A_K \operatorname{sen} \frac{2\pi K}{N\Delta t} i + B_K \cos \frac{2\pi K}{N\Delta t} i \right)$$

donde N es el número de puntos de la serie (espaciados regularmente), K es el índice de cada armónico, m el número de armónicos $m = N/2$, si N es par, y $m = (N-1)/2$, si N es impar, t es el intervalo de tiempo que separa dos puntos, i la variable temporal independiente y A_K y B_K son los coeficientes de Fourier del k -ésimo armónico.

Los coeficientes A_K y B_K son obtenidos por el método de ajuste de mínimos cuadrados, según las siguientes expresiones:

$$A_K = \frac{2}{N} \sum_{i=1}^N X_{(i)} \operatorname{sen} \frac{2\pi K}{N\Delta t} i, \quad K = 1, \dots, m$$

y

$$B_K = \frac{2}{N} \sum_{i=1}^N X_{(i)} \cos \frac{2\pi K}{N\Delta t} i, \quad K = 1, \dots, m$$

Así, la anterior ecuación referida al componente determinista $XD_{(i)}$ puede formularse de la siguiente manera:

$$XD_{(i)} = XM + \sum_{K=1}^m C_K \cos \left(\frac{2\pi K}{N\Delta t} i - \theta_K \right)$$

donde

$$C_K = (A_K^2 + B_K^2)^{1/2} \quad K = 1, \dots, m-1$$

y

$$C_m = (A_m^2 + B_m^2)^{1/2} \quad \text{si } N \text{ es impar}$$

$$C_m = \frac{1}{2} (A_m^2 + B_m^2)^{1/2} \quad \text{si } N \text{ es par}$$

y

$$\theta_K = \operatorname{arctg} (A_K/B_K) \quad K = 1, \dots, m$$

donde C_K es la amplitud y θ_K es el ángulo de fase del k -ésimo armónico.

El armónico principal queda retenido en el análisis comparativo de la varianza obte-

nida por cada armónico, que es medida para cada uno de ellos respecto al conjunto de armónicos, pudiéndose evaluar de la siguiente forma:

$$\sigma_K^2 = C_K^2 / 2 \quad K = 1, \dots, m-1$$

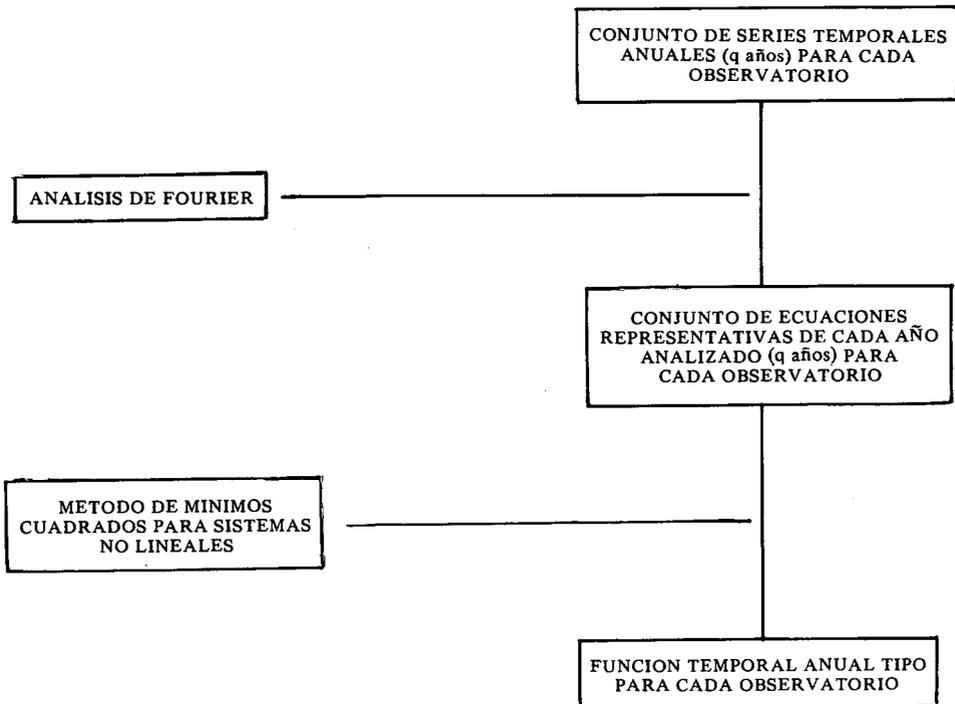
y

$$\begin{aligned} \sigma_m^2 &= C_m^2 / 2 && \text{si } N \text{ es impar} \\ \sigma_m^2 &= C_m^2 && \text{si } N \text{ es par} \end{aligned}$$

En la segunda fase del análisis de Fourier se trata de establecer, a partir del conjunto de ecuaciones correspondientes a cada año, la función temporal anual tipo, mediante la aplicación del método de mínimos cuadrados para sistemas no lineales. De esta forma, si sólo se considera el armónico principal, que para el caso de las temperaturas aquí analizado coincide con el armónico anual, se obtendrá la siguiente expresión matemática:

$$X_{t(i)} = XM_t + C_t \cos\left(\frac{2\pi}{N\Delta t} \cdot i - \theta_t\right) \quad i = 1, \dots, N$$

donde $X_{t(i)}$ es el valor típico del parámetro analizado en el punto i ; XM_t es el promedio típico, C_t es la amplitud típica y θ_t es el ángulo de fase tipo. De forma sintética el procedimiento de cálculo para la obtención de la función anual tipo se esquematiza a continuación:



Este método de cálculo ha sido aplicado al análisis de las series termométricas de los observatorios utilizados (Tarragona-ciudad y aeropuerto de Reus), referidas a las tres observaciones diarias —máxima, mínima y media—, ya que estas constituyen parámetros de la temperatura ambiente, que no sólo recogen las condiciones extremas de radiación diurna e irradiación nocturna, sino que a la vez presentan las frecuencias más significativas.

Así, del observatorio del aeropuerto se ha utilizado una serie termométrica de 25 años de longitud, de 1953 a 1984, desechando por discordancias o bajas varianzas debidas a lagunas de información los siguientes años: 1959, 1961, 1964, 1973, 1975, 1976 y 1980. Para la estación urbana de Tarragona la serie utilizada ha sido de menor duración, 20 años, de 1960 a 1984, de los cuales no se han incorporado por razones similares los años: 1961, 1964, 1973, 1976 y 1980.

COMENTARIO DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS

Los resultados alcanzados, tras el análisis de Fourier año a año para cada uno de los tres parámetros correspondientes al observatorio del aeropuerto, se recogen de forma sintetizada en el cuadro número 1, en el que se consignan los coeficientes de las ecuacio-

CUADRO 1: *Coefficientes anuales de las ecuaciones representativas de las temperaturas medias, máximas y mínimas diarias, en el Aeropuerto.*

Año	Promedio (°C)	Amplitud (°C)	Angulo de fase radianes	Varianza %
1953	15,5	8,7	-2,694	84,1
	20,3	8,3	-2,753	73,4
	11,1	9,2	-2,640	84,0
1954	15,1	9,1	-2,479	80,2
	19,3	9,5	-2,409	71,3
	10,9	8,8	-2,554	82,0
1955	16,2	7,1	-2,696	77,7
	20,7	7,2	-2,695	76,7
	11,7	7,0	-2,697	69,8
1956	14,6	8,3	-2,685	82,8
	19,5	8,1	-2,676	78,6
	9,7	8,5	-2,693	78,9
1957	15,1	7,2	-2,716	81,1
	20,1	6,9	-2,705	72,8
	10,1	7,7	-2,726	78,1
1958	16,2	7,5	-2,594	83,8
	21,0	7,5	-2,686	80,9
	11,4	7,6	-2,502	76,7
1960	16,0	7,1	-2,781	84,0
	20,4	7,2	-2,812	78,8
	11,6	7,1	-2,750	80,7
1962	16,0	7,7	-2,633	79,8
	20,4	7,6	-2,639	74,5
	11,6	7,8	-2,627	77,4
1963	15,7	7,9	-2,679	83,7
	20,2	8,2	-2,727	81,2
	11,1	7,7	-2,627	78,7
1965	15,7	7,4	-2,682	83,8

CUADRO 1: *Coefficientes anuales de las ecuaciones representativas de las temperaturas medias, máximas y mínimas diarias, en el Aeropuerto. (Continúa)*

Año	Promedio (°C)	Amplitud (°C)	Angulo de fase radianes	Varianza %
	20,3	7,5	-2,716	81,8
	11,2	7,3	-2,648	75,0
1966	16,4	6,9	-2,717	80,7
	21,1	6,8	-2,772	77,0
	11,8	7,0	-2,664	73,6
1967	15,9	7,3	-2,657	80,4
	20,4	7,3	-2,673	76,0
	11,4	7,4	-2,641	75,2
1968	15,8	6,9	-2,534	83,7
	20,2	7,1	-2,538	79,9
	11,4	6,8	-2,530	76,3
1969	15,1	7,2	-2,702	80,3
	19,7	7,7	-2,646	78,3
	10,6	6,7	-2,766	72,0
1970	15,5	7,8	-2,642	83,3
	20,3	7,8	-2,671	80,2
	10,8	8,0	-2,613	77,7
1971	15,2	8,1	-2,645	82,8
	20,0	8,3	-2,642	80,1
	10,3	7,8	-2,648	77,1
1972	14,6	6,3	-2,676	81,3
	19,2	6,3	-2,707	77,0
	10,0	6,2	-2,645	78,1
1974	15,1	6,8	-2,747	78,7
	20,1	6,8	-2,682	75,7
	10,1	6,7	-2,814	75,2
1977	15,3	5,8	-2,595	75,4
	19,7	6,0	-2,645	69,3
	10,8	5,7	-2,542	70,3
1978	15,5	6,8	-2,604	78,9
	20,2	7,0	-2,595	76,5
	10,8	6,6	-2,612	72,4
1979	15,7	7,0	-2,652	81,0
	20,4	7,3	-2,676	79,9
	11,1	6,7	-2,626	71,2
1981	15,9	6,9	-2,589	79,0
	20,7	7,0	-2,583	74,8
	11,1	6,9	-2,594	72,8
1982	16,1	7,2	-2,669	84,3
	20,8	7,5	-2,666	81,9
	11,4	6,9	-2,672	77,3
1983	16,0	8,1	-2,613	85,4
	21,1	7,8	-2,649	80,2
	10,9	8,3	-2,580	80,8
1984	15,1	7,2	-2,530	82,9
	20,0	7,3	-2,520	79,1
	10,2	7,0	-2,539	76,9

nes correspondientes a las temperaturas medias, máximas y mínimas diarias de cada año analizado.

Tal como se desprende de la lectura del cuadro, el porcentaje de varianza correspondiente al primer armónico es elevado en la totalidad de los casos y, por tanto, ampliamente significativo. En el caso de las temperaturas medias diarias, la varianza oscila entre el 75,4% y el 85,3%, en las temperaturas máximas diarias varía entre el 69,3% y el 81,9% y, por último, el correspondiente a las temperaturas mínimas lo hacen entre el 69,7% y el 84%.

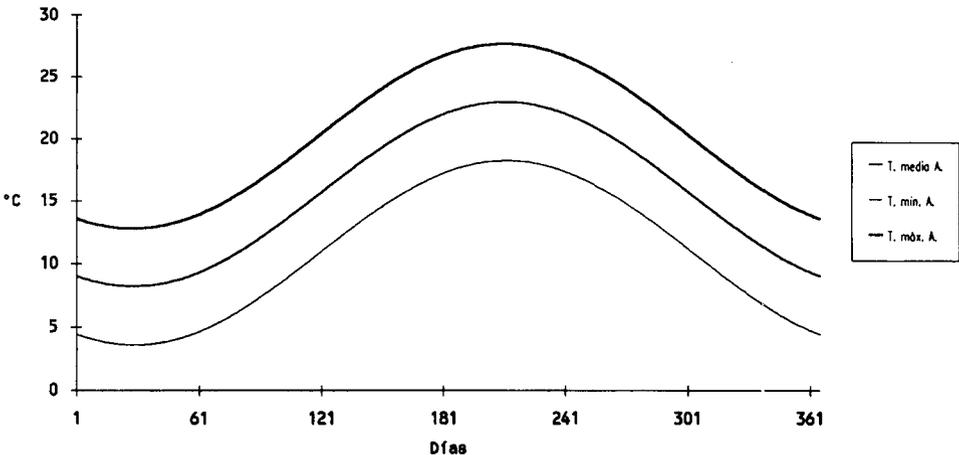
Finalmente, los coeficientes de la ecuación que establece la función temporal anual tipo de las temperaturas medias, máximas y mínimas diarias para el aeropuerto, se facilitan en el cuadro número 2.

CUADRO 2: *Parámetros del año tipo de las temperaturas medias, máximas y mínimas diarias en el Aeropuerto.*

	Promedio °C	Amplitud °C	Angulo de fase radianes
Temperatura media	15,6	7,4	-2,645
Temperatura máxima	20,2	7,4	-2,655
Temperatura mínima	10,9	7,3	-2,635

A partir de estos valores se ha procedido a la representación del año tipo de las tres temperaturas correspondientes al aeropuerto, siendo reproducidos en la gráfica número 1.

Como corresponde al clima regional en el que se hallan localizados los dos observatorios meteorológicos, la función anual tipo representa una curva senoidal, en la que el máximo térmico coincide en líneas generales con los últimos días de julio y primeros de agosto y el mínimo con los finales de enero y principios de febrero, respectivamente. La curva señala un ritmo uniforme de ascenso desde principios de febrero a primeros de agosto y un suave descenso desde este período a finales de enero.



Gráfica 1: Temperaturas máxima, mínima y media calculadas. Año tipo. Aeropuerto. (Período 1952-84)

Un aspecto que conviene destacar, es el referido al cálculo de los días del año en el que con mayor probabilidad se producirán los más altos y bajos valores del parámetro analizado. Valores que se conseguirán maximizando y minimizando, respectivamente, la expresión siguiente:

$$T_{(n)} - VM = AM \cos\left(\frac{2\pi n}{365} - DF\right)$$

siendo VM el promedio, AM la amplitud y DF el ángulo de fase, correspondiendo el valor más alto al día:

$$n_a = \left(1 + \frac{DF}{2\pi}\right) 365$$

y el mínimo al día:

$$n_b = \left(1/2 + \frac{DF}{2\pi}\right) 365$$

El cálculo efectuado para el caso de las temperaturas máximas arroja como día en el que se registran los más altos valores del año el 30 de julio; en sentido inverso, el 28 de enero se produciría el mínimo valor. En el caso de las temperaturas mínimas, ambos momentos se atrasan ligeramente, ya que el más alto valor se produciría el 31 de julio y el mínimo el 29 de enero. Por último, la temperatura media presenta como día más probable en el que se daría el máximo valor el 30 de julio y el mínimo en el 29 de enero. En torno a estos días se verifican con mayor probabilidad los máximos y mínimos térmicos anuales.

Por otro lado, no ha de extrañar que los máximos valores en los tres parámetros se produzcan en torno a los últimos días del mes de julio, ya que el régimen de temperaturas de los observatorios litorales sufre un desplazamiento en el tiempo, respecto al máximo de radiación solar teórica, al verse especialmente afectado por la inercia térmica introducida por el sustrato marino adyacente.

A continuación, se facilitan en el cuadro número 3 los coeficientes de las ecuaciones

CUADRO 3: *Coefficientes anuales de las ecuaciones representativas de las temperaturas medias, máximas y mínimas diarias, en la ciudad.*

Año	Promedio (°C)	Amplitud (°C)	Angulo de fase radianes	Varianza %
1960	15,8	7,2	-2,734	80,7
	20,3	7,6	-2,789	75,0
	11,3	7,0	-2,674	76,1
1962	15,6	7,0	-2,571	72,8
	19,1	7,1	-2,562	63,9
	12,0	6,9	-2,581	71,5
1963	15,8	7,5	-2,610	83,6
	19,0	7,5	-2,633	80,2
	12,7	7,7	-2,586	80,8
1965	15,7	6,7	-2,637	84,3
	19,0	6,4	-2,703	81,0
	12,4	7,0	-2,576	80,4
1966	16,4	6,2	-2,701	78,4

CUADRO 3: *Coefficientes anuales de las ecuaciones representativas de las temperaturas medias, máximas y mínimas diarias, en la ciudad. (Continúa)*

Año	Promedio (°C)	Amplitud (°C)	Angulo de fase radianes	Varianza %
1967	19,5	6,1	-2,701	74,5
	13,2	6,3	-2,702	73,7
	16,0	6,7	-2,558	80,0
	19,2	6,6	-2,581	75,9
1968	12,7	7,0	-2,536	76,4
	16,1	6,5	-2,462	83,4
	19,4	6,4	-2,411	80,1
1969	12,7	6,6	-2,511	79,9
	15,6	6,7	-2,647	80,7
	19,3	6,8	-2,639	78,6
1970	11,9	6,6	-2,655	75,0
	16,1	7,2	-2,556	83,0
	20,1	6,9	-2,573	78,1
1971	12,2	7,5	-2,540	80,6
	15,8	7,5	-2,621	84,5
	19,7	7,5	-2,592	81,8
1972	11,8	7,4	-2,649	80,7
	15,3	5,7	-2,591	82,5
	19,1	5,7	-2,640	77,5
1974	11,4	5,7	-2,543	75,7
	15,3	6,5	-2,731	80,4
	20,2	6,5	-2,646	76,8
1975	10,3	6,5	-2,816	75,0
	15,5	7,4	-2,634	83,0
	20,4	7,4	-2,639	79,7
1977	10,7	7,4	-2,629	77,5
	16,0	6,2	-2,463	80,0
	20,8	6,7	-2,411	78,9
1978	11,2	5,6	-2,525	70,2
	16,5	6,6	-2,626	79,4
	21,7	6,7	-2,679	78,5
1979	11,2	6,5	-2,572	73,2
	16,3	6,8	-2,667	82,1
	21,3	7,1	-2,722	82,3
1981	11,4	6,6	-2,607	72,9
	16,3	6,3	-2,580	76,5
	20,1	6,3	-2,600	75,4
1982	12,5	6,3	-2,561	69,2
	16,6	7,1	-2,589	84,8
	20,1	7,2	-2,612	82,9
1983	13,1	7,0	-2,565	78,4
	16,5	7,4	-2,566	84,2
	20,0	7,2	-2,593	79,8
1984	13,1	7,6	-2,540	81,1
	15,6	6,7	-2,466	81,5
	19,1	6,7	-2,480	78,5
	12,2	6,6	-2,452	75,6

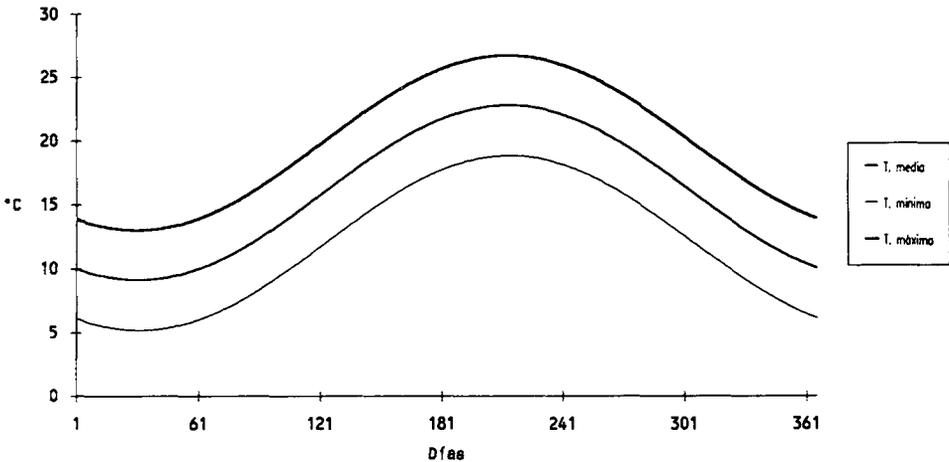
representativas de las temperaturas medias, máximas y mínimas diarias para cada año analizado, referidas al observatorio urbano.

En este caso, la varianza retenida por la temperatura media diaria oscila entre el 72,8% y el 84,8%, la correspondiente a las temperaturas máximas lo hace entre el 63,9% y el 82,9% y, por último, la referida a la temperatura mínima varía entre el 69,2% y el 81,1%. Como en el observatorio del aeropuerto, la varianza de cada año se sitúa en un estrecho margen, indicativo del alto índice de significación de los parámetros.

De la anterior información se ha calculado el año tipo de los tres parámetros, siendo sus coeficientes reproducidos en el cuadro número 4.

CUADRO 4: *Coefficientes del año tipo de las temperaturas medias, máximas y mínimas diarias en la ciudad.*

	Promedio °C	Amplitud °C	Angulo de fase radianes
Temperatura media	15,9	6,8	-2,599
Temperatura máxima	19,9	6,8	-2,609
Temperatura mínima	12,0	6,8	-2,589



Gráfica 2: Temperaturas máxima, mínima y media calculadas. Año tipo. Ciudad. (Período 1958-84)

De estos coeficientes se han deducido y representado en la gráfica número 2 el año tipo de las tres temperaturas diarias, indicativo del ritmo anual más probable de las mismas a lo largo del año para la ciudad de Tarragona.

Las características generales en el comportamiento anual de las tres temperaturas, tal como refleja la gráfica, son similares a las establecidas para el aeropuerto, ya que ambas localizaciones se hallan en el mismo dominio climático mediterráneo con una marcada influencia termoreguladora de este mar. Por ello, la evolución anual registrada en las curvas presenta un progresivo ascenso desde principios de febrero hasta alcanzar los primeros días de agosto, desde los que desciende hasta los días iniciales de febrero en donde obtiene los más bajos valores.

No obstante, un primer indicio del comportamiento térmico diferenciado entre Tarragona y el aeropuerto, así como del mayor índice de continentalidad de este último respecto del observatorio urbano relacionado con su mayor lejanía de la costa —la ciudad de Tarragona se halla emplazada sobre la franja litoral y el aeropuerto a ocho kilómetros al interior de la misma—, se deduce del cálculo de los días en que con más elevada probabilidad se registrarán los más altos y bajos valores del año para cada parámetro. En efecto, las temperaturas medias obtienen el 2 de agosto su máximo valor, tres días después que en el aeropuerto, y en el 31 de enero, su mínima expresión anual, dos días más tarde que en las afueras. En el caso de las temperaturas máximas, el más alto valor se produce el 1 de agosto, dos días después que en Reus; mientras que el más bajo se produce el 31 de enero, tres días más tarde. Finalmente, las temperaturas mínimas que, por otra parte, constituyen el parámetro que mejor recoge el impacto climático de la urbanización, presentan un desfase más acentuado, ya que el mayor valor se produce el 3 de agosto, tres días más tarde que en el aeropuerto, y el menor el 1 de febrero, cuatro días después.

Además, si se yuxtaponen las dos gráficas representativas del año tipo de las tres observaciones referidas al aeropuerto y al observatorio urbano, se manifiesta el distinto comportamiento anual entre los dos medios. Así, en la gráfica número 3 aparecen superpuestas las curvas respectivas a las tres temperaturas diarias para ambos observatorios.

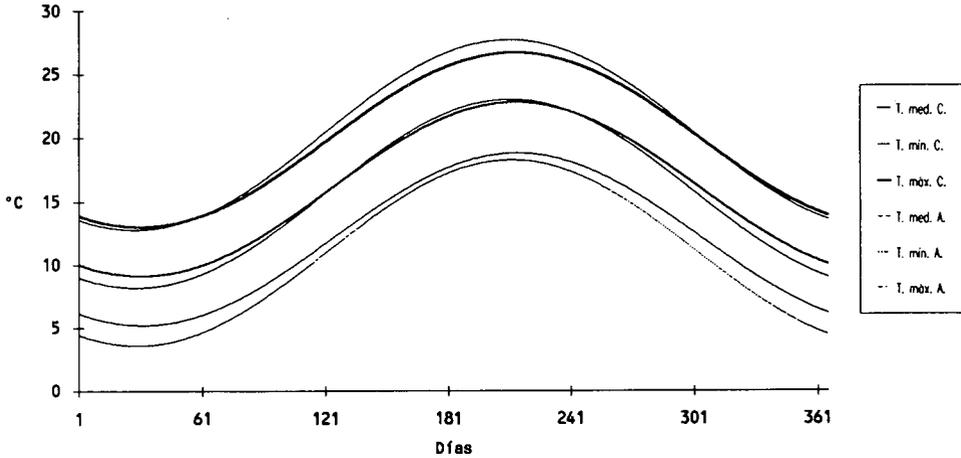
Como se desprende de la misma, las curvas representativas de los años tipo presentan valores que difieren entre un observatorio y otro. En efecto, la correspondiente a las temperaturas máximas señala, especialmente en la mitad cálida del año, mayores temperaturas probables en el aeropuerto que en la ciudad, mientras que en la otra mitad son semejantes o débilmente superiores en la ciudad, particularmente en los meses invernales. Estos resultados concuerdan con los establecidos en otras investigaciones, en los que se ha puesto de manifiesto la fluctuación diaria y anual de la isla de calor urbana, al ser en líneas generales las temperaturas máximas superiores en la periferia no urbanizada, especialmente en la mitad cálida del año (Landsberg, H.E. 1981: 100-102).

Por el contrario, en el caso de las temperaturas mínimas, la ciudad registra a lo largo del año más altos valores, que se incrementan notablemente en los meses invernales y se reducen en los de primavera y verano, para aumentar a partir de otoño y alcanzar las máximas diferencias en los de invierno. Por último, las temperaturas medias diarias, al recoger las condiciones promedio de las dos anteriores, señalan valores semejantes en los primeros meses de primavera y otoño y ligeramente superiores en el aeropuerto durante el verano, para pasar a ser más elevados en la ciudad en los meses de invierno.

Ello, inicialmente, evidencia el distinto comportamiento térmico existente entre Tarragona y sus alrededores, especialmente recogido en la curva representativa del año tipo de las temperaturas mínimas. Efectivamente, éstas constituyen el parámetro térmico que recoge con mayor claridad el impacto urbano en el área de estudio, coincidiendo con los resultados obtenidos en otras investigaciones. En términos generales, ello se deriva de las características atmosféricas dominantes en el momento en que esta temperatura se registra, al coincidir con las condiciones de máxima irradiación nocturna y el momento del día en el que con mayor frecuencia se verifican situaciones de estabilidad, por lo que el distinto comportamiento radiativo de las superficies urbanas se deja sentir con mayor intensidad.

Por otro lado, se ha procedido al cálculo de la función temporal anual tipo para un conjunto de años iniciales y finales de las series utilizadas, con el objetivo de evaluar el impacto que el crecimiento urbano-industrial, verificado en el área de estudio entre ambos períodos, haya podido determinar en el régimen térmico de los dos medios, especialmente en el de la ciudad que ha sido el ámbito afectado por dichas transformaciones espaciales.

Así, en el cuadro número 5 se ofrecen los coeficientes representativos de la función anual tipo para los dos períodos de cuatro años de duración establecidos, que comprenden de 1960 a 1965, excluyendo 1961 y 1964 por no ofrecer garantías, y de 1981 a 1984, ambos inclusivos, referidos en primer lugar a la ciudad de Tarragona.



Gráfica 3: Comparación años tipo temperaturas máxima, mínima y media entre la ciudad y el Aeropuerto.

CUADRO 5: Coeficientes de los años tipo de las temperaturas medias, máximas y mínimas diarias correspondientes a la ciudad (1960-65 y 1981-84).

	<i>C i u d a d</i>					
	<i>Promedio</i>		<i>Amplitud</i>		<i>Angulo de fase</i>	
	<i>1960-65</i>	<i>1981-84</i>	<i>1960-65</i>	<i>1981-84</i>	<i>1960-65</i>	<i>1980-84</i>
Temperatura media	15,7	16,3	7,1	6,7	-2,635	-2,553
Temperatura máxima	19,3	19,8	7,2	6,8	-2,670	-2,572
Temperatura mínima	12,1	12,7	7,1	6,9	-2,602	-2,534

A continuación en el cuadro número 6 se ofrecen los correspondientes al aeropuerto.

De la comparación de los datos consignados en ambos cuadros se desprende, en primer lugar, la escasa o nula variación existente en el observatorio de las afueras entre un período y otro para el conjunto de los tres parámetros, ya que el medio en el que se halla emplazado no ha sufrido cambios espaciales reseñables, por lo que estos valores evidencian el similar comportamiento térmico que cabría esperar. En segundo lugar, el observa-

CUADRO 6: Coeficientes de los años tipos de las temperaturas medias, máximas y mínimas diarias correspondientes al Aeropuerto (1960-65 y 1981-84).

	<i>A e r o p u e r t o</i>					
	<i>Promedio</i>		<i>Amplitud</i>		<i>Angulo de fase</i>	
	<i>1960-65</i>	<i>1981-84</i>	<i>1960-65</i>	<i>1981-84</i>	<i>1960-65</i>	<i>1980-84</i>
Temperatura media	15,8	15,8	7,5	7,3	-2,193	-2,597
Temperatura máxima	20,3	20,6	7,6	7,4	-2,037	-2,602
Temperatura mínima	11,4	10,9	7,5	7,3	-2,657	-2,593

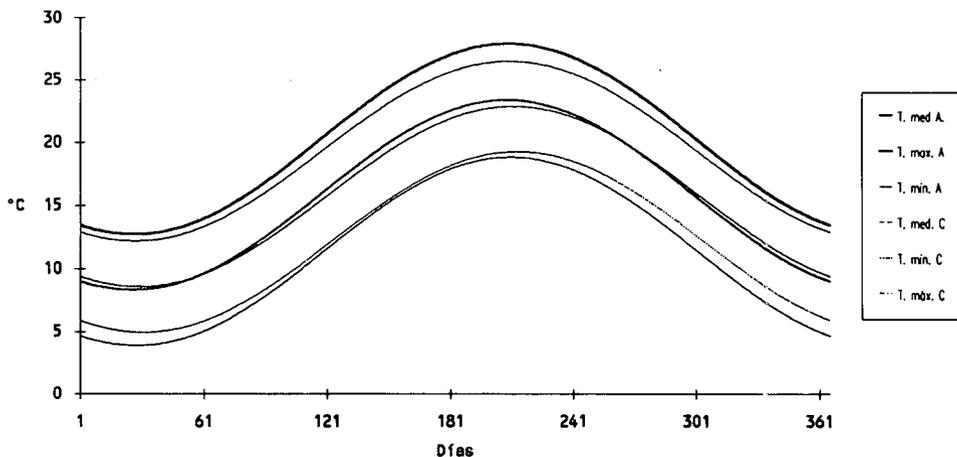
torio urbano presenta un claro incremento térmico entre el período inicial y el final, situado en torno a los 0,6°C de promedio anual, cifra reseñable si se tiene en cuenta el carácter meramente abstracto e indicativo de este valor. Este resultado ha de traducirse necesariamente como indicador del impacto que la expansión urbanística de la ciudad ha originado sobre el régimen térmico anual de los tres parámetros, al no haber cambiado ningún otro de los factores que los determinan.

A partir de estos resultados, se han superpuesto en la grafica número 4 las curvas representativas de las tres temperaturas diarias para el primer período establecido, referidas a los dos observatorios.

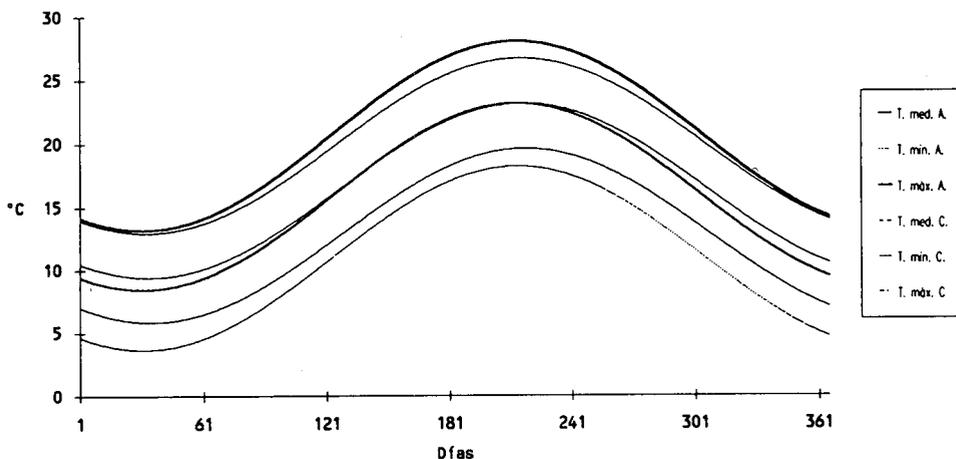
El año tipo de la temperatura máxima en este primer período presenta valores más elevados en el aeropuerto que en la ciudad a lo largo del año, siendo especialmente más altos en los meses del verano. Respecto a las temperaturas medias, los valores señalan ligeras diferencias, al ser algo más elevados también en el aeropuerto durante la mitad cálida del año y semejantes en los meses de las estaciones intermedias, siendo en el invierno débilmente superiores en la ciudad. Finalmente, las temperaturas mínimas, muestran un similar comportamiento durante la primavera y principios de verano, para ser a finales del estío, durante el otoño y en invierno ligeramente más altas en la ciudad.

En la gráfica número 5 se representan los años tipos de los dos observatorios correspondientes al período final de la serie (1981-84).

En esta ocasión, las curvas comparadas señalan mayores contrastes, especialmente la referida a las temperaturas mínimas. En efecto, este parámetro en la ciudad presenta claramente más altos valores que en el aeropuerto a lo largo del año, especialmente de agosto a marzo, situación que no se aprecia con tal nitidez en el primer período. Este hecho, ha de relacionarse, como se ha mencionado, con el impacto que sobre el comportamiento de este parámetro ha ejercido el crecimiento de la urbanización. Consecuentemente, las temperaturas medias presentan valores semejantes desde finales de primavera y verano, siendo desde otoño y en invierno, con mayor realce, superiores en la ciudad. Por último, las temperaturas máximas siguen obteniendo valores más elevados en el aeropuerto, principalmente de marzo a setiembre y con especial amplitud durante el verano, sin embargo, las diferencias no aparecen tan marcadas como en el período inicial, siendo en los meses invernales casi nulas.



Gráfica 4: Comparación años tipo temperaturas máxima, mínima y media entre la ciudad y el Aeropuerto. (Período 1960-65)



Gráfica 5: Comparación años tipo temperaturas máxima, mínima y media entre la ciudad y el Aeropuerto. (Período 1981-84)

CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos validan la utilización del análisis armónico en el establecimiento de los contrastes térmicos urbano-rurales en el área de estudio, al dotar a éstos de un significado más exacto y riguroso. Tras la aplicación de esta técnica, se ha evidenciado, inicialmente, el distinto comportamiento térmico entre la ciudad de Tarragona y su periferia, recogido especialmente en los dos registros representativos de las condiciones extremas de radiación solar y radiación terrestre.

Paralelamente, se ha puesto de manifiesto, en concordancia con otras investigaciones, la fluctuación diaria y anual de la isla de calor urbana, al registrarse a lo largo del día mayores temperaturas mínimas en la ciudad y, por el contrario, más altos valores de las temperaturas máximas en el aeropuerto. Además, también se constata una oscilación en la amplitud estacional de los contrastes, al ser más elevados, para las temperaturas mínimas, en el otoño e invierno y reducirse en la primavera y verano; mientras que, para las temperaturas máximas, las mayores amplitudes se producen en la mitad cálida y disminuyen en el resto del año, principalmente en invierno.

Finalmente, cabe destacar la influencia que la expansión urbanística y el crecimiento industrial de la ciudad de Tarragona ha generado en el régimen de los tres parámetros analizados, al constatar un claro incremento térmico en la ciudad para el conjunto de observaciones entre los dos períodos comparados y no verificarse un similar comportamiento en el observatorio de las afueras.

Notas bibliográficas

- ADAMOWSKY, K. (1971): "Spectral density of a river flow time series". *Journal of Hidrology*, 14, pp. 43-52.
- ÁLVAREZ, N. (1986): *Aplicación del análisis armónico a fenómenos meteorológicos y económicos*, Madrid, I. N. M., Publ. A-111, 160 pp.
- BALDASANO, J.M. (1983): "Simulación y previsión de la temperatura y el oxígeno disuelto de un

- embalse con estratificación vertical", *V Asamblea Nacional de Geodesia y Geofísica*, Madrid, 21-25 de novbre.
- BALDASANO, J.M. y CORONAS, A. (1981): "Análisis de la radiación solar global. Ecuación 'año típico'", *Energía, Marzo-Abril*, pp. 109-112.
- BALDASANO, J.M. y CREMADES, L. (1988): *Datos para el mapa de radiación solar en Cataluña. 1988*, Barcelona: Depto. de Proyectos de Ingeniería de la U.P.C., policopiado, 67 pp.
- BALLING, R.C. (1982): "Harmonic analysis of monthly insolation levels in the United States", *Solar Energy*, 31 (2), pp. 239-298.
- BALLING, R.C. y CERVENY, R.S. (1982): "Spatial and temporal variations in long-term normal percent possible solar radiation levels in the United States", *Solar Energy*, 31 (3), pp. 293-298.
- BEVERIDGE, W. (1922): "Wheat prices and rainfall in western Europe", *Journal Royal Statistical Society*, pp. 422-478.
- BRUNET, M. (1989): *La influencia de la urbanización en el clima local. Un ensayo de Climatología Urbana: El caso de Tarragona*, Tarragona: Depto. Geografía, tesis de doctorado, policopiada, pp. 301-363.
- CORONAS, A. y BALDASANO, J.M. (1984): "Fourier Analysis of meteorological data to obtain a typical annual time function", *Solar Energy*, 32 (4), pp. 479-488.
- EGIDO, M.; YUSTE, J.M.; GARMENDIA, J. y SECO, J. (1980): "Estudio armónico y estadístico de la radiación solar en Salamanca", *Anales de Edafología y Agrobiología*, 39 (1-2), pp. 277-295.
- HSU, C.F. y WALLACE, J.M. (1976): "The global distribution of the annual and semiannual cycles in precipitation", *Monthly Weather Review*, 104, pp. 1093-1101.
- LANDSBERG, H.E. (1970): "Micrometeorological temperature differentiation through urbanization", *Urban Climates*, W.M.O. Publ., Tech. Note n.º 108, pp. 129-136.
- LANDSBERG, H.E. (1981): *The urban climate*, New York, Academic Press.
- LONG, L.L. (1976): "Water temperature forecasting and estimation using Fourier series and Communication Theory Techniques", *Water Resources Research*, 12 (5), pp. 881-887.
- LOWRY, W.P. (1977): "Empirical Estimation of urban effects on climate: a problem analysis", *Journal of Applied Meteorology*, 16, pp. 129-135.
- LUDWIG, F.L. (1970): "Urban temperature fields", *Urban Climates*, W.M.O. Publ., Tech. Note n.º 108, pp. 80-107.
- MITCHELL, J.M. Jr. (1961): "The thermal climate of cities", *Symposium Air over Cities*, U.S. Public Health Serv. Publ., SEC, Tech. Report A62-5, pp. 131-143.
- NERLOVE, M., GREYER, D.M. y CARVALHO, J.L. (1979): *Analysis of economic time series*, New York, Academic Press.
- NÚÑEZ, J.M. y PÉREZ, J. (1975): "Contribución al estudio de la marea solar atmosférica en Barcelona", *Revista de Geofísica*, 34 (3-4), pp. 269-290.
- PÉREZ, J. y NÚÑEZ, J.M. (1974): "Nota sobre la variación anual de la temperatura en Barcelona", *Revista de Geofísica*, 33 (3-4), pp. 245-262.
- PÉREZ, J. y NÚÑEZ, J.M. (1976): "Comparación entre los análisis armónicos de la insolación y de la nubosidad", *Urania*, 285, pp. 99-109.
- ROPELEWSKY, C.F. y HALPERT, M.S. (1986): "North American precipitation and temperature patterns associated with the El Niño/Southern Oscillation (ENSO)", *Monthly Weather Review*, 114, pp. 2352-2362.
- SEKIGUTI, T. (1970): "Thermal situations of urban areas horizontally and vertically". *Urban climates*, W.M.O. Publ., Tech. Note n.º 108, pp. 137-140.
- THOMANN, R.V. (1967): "Time-series analysis of water-quality data", *Journal of Sanitary Eng. Division*, 93, SA1, pp. 1-23.

Résumé: L'application de l'analyse de Fourier à l'établissement des contrastes thermiques urbains-ruraux

Cet article a comme objectif la mise au point et l'application de l'analyse harmonique à l'établissement et à l'évaluation exacte des différences thermiques existant entre la ville de Tarragone et sa périphérie non urbanisée. Cette étude vise également à mettre en évidence l'influence que le développement urbain-industriel de la ville génère dans son régime thermique. L'application de l'analyse de Fourier a permis de réduire la quantité considérable d'information numérique des séries thermométriques utilisées à une fonction temporelle annuelle type, qui calcule la valeur la plus notable de la température de l'air pour n'importe quel jour de l'année, en permettant de contraster avec précision les séries météorologiques représentatives de les deux milieux. Les résultats obtenus mettent en évidence aussi bien le rechauffement urbain que l'impact thermique du développement urbanistique.

Abstract: The application Fourier's analysis to establishment of the urban-rural thermal contrast

The purpose of this paper is to use the Fourier's Analysis to establish an accurate evaluation of the thermal difference between the town of Tarragona and theirs surroundings. The influence of the urban and industrial growth on their thermal regime can be shown from the study done. The application of the Fourier's Analysis has allowed to reduce the data number of the daily air temperature used, obtaining a typical annual time function. This function allows the calculation of the value of the mean daily air temperature corresponding for any day along the year. The comparison of the typical annual time functions obtained corresponding to the town and the surroundings shows the thermal impact of the urban growth.