EVOLUCIÓN TEMPORAL DE LAS OLAS DE CALOR EN LA MESETA CENTRAL ESPAÑOLA, ENTRE 1961 Y 2010

Ángel L. LABAJO IZQUIERDO[1], Moisés EGIDO MANZANO[2],
Quintín MARTÍN MARTÍN[3], Juan LABAJO MONTERO[4] y José L. LABAJO SALAZAR[2].
[1]*Departamento de Informática y Automática. Universidad de Salamanca.*
[2]*Departamento de Física General y de la Atmósfera. Universidad de Salamanca.*
[3]*Departamento de Estadística. Universidad de Salamanca.*
[4]*Grupo Geoclima. Universidad Autónoma de Madrid.*
alabajo@usal.es, moi95@usal.es, qmm@usal.es, juan_labajo@hotmail.com, jll45@usal.es

RESUMEN

Se establece el comportamiento temporal de las frecuencias anuales de olas de calor producidas entre 1961 y 2010. A partir de los datos diarios de anomalías de temperatura se determinan las series de anomalías diarias de temperaturas máxima (ATMAD) y mínima (ATMID) para el área de trabajo. Se obtienen los valores umbrales de las dichas anomalías, determinados por el percentil P_{90} de las series correspondientes. Se establece la existencia de ola de calor cuando se observan dos o más días consecutivos en los que ATMAD y ATMID superan, simultáneamente, los valores de los umbrales establecidos. Se identifican las olas de calor que han afectado a la Meseta Central española durante el periodo de estudio y se establecen sus frecuencias mensuales y anuales. Los resultados indican que los meses de mayor número de olas de calor entre 1961 y 2010, son Mayo (25 olas) y Junio (23 olas). El análisis de tendencia de las series de frecuencias anuales obtenidas indica que existe una tendencia creciente de las olas de calor con un nivel de confianza mayor del 99%. El modelo lineal establece que, se ha producido un aumento en la frecuencia de olas de calor en la Meseta Central española del orden de 0,6 olas cada 10 años.

Palabras clave: Anomalía, temperatura, olas de calor, frecuencia, tendencia.

ABSTRACT

The temporal behavior of annual frequency of heat waves, produced between 1961 and 2010, is established. From the daily data of temperature, the maximum and the minimum temperature anomalies (ATMAD and ATMID) for the studied zone are obtained. The values of the thresholds of these anomalies, determined by the 90 percentile of the corresponding series are calculated. The existence of heat wave is established when there are two or more consecutive days in which ATMAD and ATMID exceed, at the same time, the values of the corresponding thresholds. The heat waves that have affected the Spanish Central Plateau during the study period are identified, and its annual and monthly frequencies are established. The results indicate that the months of highest number of waves of heat between 1961and 2010 are May (25 waves) and June (23 waves). Analysis of trend of the series of annual frequencies obtained indicates that there is an increasing trend of heat waves to a greater than 99% confidence level. The linear model establishes that there has been an

increase in the frequency of heat waves in the Spanish Central Plateau in the order of 0.6 waves every 10 years.

Keywords: Anomaly, temperature, heat waves, frequency, trend.

1. INTRODUCCIÓN

Los fenómenos atmosféricos extremos, huracanes, grandes riadas, olas de calor o frío, han influido siempre negativamente en el desarrollo normal de las actividades humanas dando lugar a daños materiales muy importantes, daños que han llegado a afectar a la seguridad de las personas incluso con pérdida de vidas, además de otra serie de repercusiones de tipo económico, que han aumentado significativamente el interés por conocer cómo y cuando se producen. En las dos últimas décadas los eventos meteorológicos extremos están siendo analizados minuciosamente por numerosos investigadores en relación con su incidencia en la evolución temporal en sus valores medios (Brunetti *et al.*, 2001; Labajo *et al.*, 2004; Shouraseni *et al.*, 2004, Labajo *et al.*, 2006 y 2008). En el caso de la temperatura se han realizado estudios del comportamiento temporal de sus valores extremos diarios a distintas escalas espaciales (Manton *et al.*, 2001; Salinger y Griffiths, 2001; Domonkos *et al.*, 2003; Klein y Können, 2003, Ortega *et al.* 2006). Especial importancia presenta el estudio del comportamiento temporal de la frecuencia anual de los eventos de extremado calor en relación con su influencia en gran parte de los ámbitos de desarrollo de la actividad humana, en concreto en el ámbito de la salud (Kyselý, 2002; Khaliq et al., 2005; Baldi *et al*., 2006; Trigo *et al.*, 2006).

En este trabajo, a partir de una definición previa de día extremadamente cálido, vamos a establecer las condiciones que determinan la existencia de una ola de calor desde un punto de vista estrictamente climatológico y a estudiar la tendencia temporal de la frecuencia anual de olas de calor en la Meseta Central española entre 1961 y 2010.

2. DATOS Y METODOLOGÍA

La zona de estudio seleccionada es la Meseta Central española que cubre un área comprendida entre los 38º 01´ N y 43º 14´ N y los 0º 54´ W y 06º 07´ W (Fig.1). Los datos empleados para este estudio, proporcionados por la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET), son datos de observación de temperaturas máxima y mínima diarias, obtenidos en los observatorios de Ávila, Burgos, León, Salamanca, Segovia, Soria, Valladolid (Villanubla), Zamora, Los Llanos (Albacete), Ciudad Real, Cuenca, Toledo, Madrid (Retiro) y Barajas (Madrid), durante el periodo 1961-2010.

Con esta base de datos diarios se han construido las series de anomalías de las temperaturas máximas diarias (ATMAD) y de anomalías de las temperaturas mínimas diarias (ATMID), entendiéndose por anomalía la diferencia respecto de la media de cada día. El considerar las series de anomalías en lugar de las series de datos observados es porque así se elimina la estacionalidad y, además, su variabilidad es mucho menor que la de los datos de temperatura observados Esto va a permitir el hacer un estudio anual sin tener que restringir el análisis a una época determinada del año.

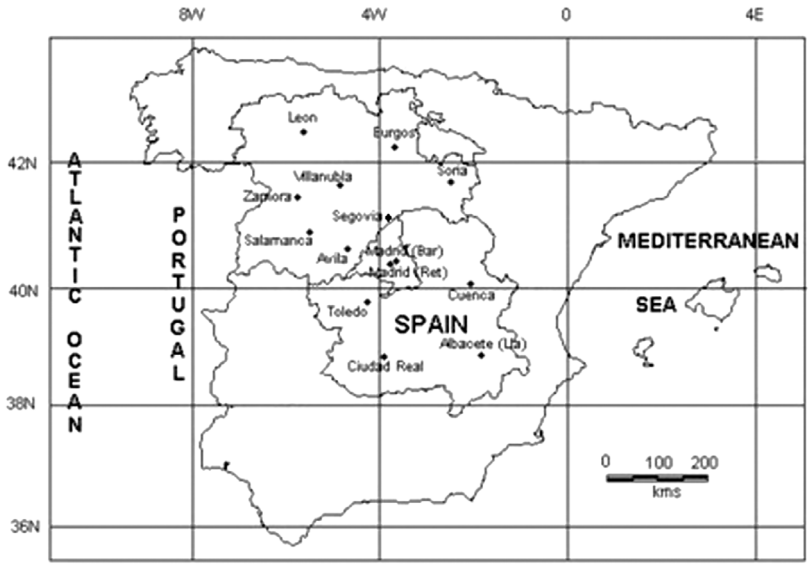

FIG. 1: *Zona de Estudio*

A partir de las series de anomalías se construyen las series regionales de anomalías de temperaturas máximas y mínimas diarias en la Meseta Central española. Para construir estas series empleamos las de los observatorios seleccionados, utilizando el método del inverso de la distancia (Jones y Hulme, 1996).

A partir de las series de datos de ATMD y ATMID, obtenidas y testadas en trabajos anteriores (Labajo *et al*. 2004, 2006 y 2008), y siguiendo el criterio de los percentiles, ampliamente empleado para determinar los umbrales de valores extremos de variables climáticas, (Manton *et al*., 2001; Salinger y Griffiths, 2001; De Gaetano y Allen, 2002; Griffiths *et al*., 2003; Labajo *et al*, 2004, 2006 y 2008), se establecen los umbrales que van a permitir definir el día extremadamente cálido (DEC), de la misma manera que se definen los días extremadamente fríos (DEF) (Labajo y Labajo, 2010).

Se consideran días extremadamente cálidos aquellos en los que las ATMAD y las ATMID superan, simultáneamente, los valores de los umbrales determinados por los percentiles P_{95}. Estos valores umbrales se calculan a partir de las series de datos de ATMAD y ATMID. La razón de escoger estos valores umbrales se indica en trabajos anteriores (Labajo *et al*. 2004, 2006 y 2008). Para la determinación de las olas de calor puede resultar demasiado restrictivo el establecer como umbrales los valores del percentil 95, por ello también se determinarán los valores correspondientes al percentil 90 (los umbrales que se obtienen con el percentil 95 se utilizarán para determinar las olas de calor más intensas). Estos valores umbrales se muestran en la tabla 1

		ATMAD (ºC)	**ATMID (ºC)**
Percentiles	90 (P_{90})	4,82	6,03
	95 (P_{95})	3,71	4,64

TABLA 1: *Valores umbrales de ATMAD y ATMID determinados por los percentiles P_{90} y P_{95}, para las series completas de datos.*

En función de los valores umbrales obtenidos, y haciendo uso de un paquete de software que hemos desarrollado para la determinación de los DEC en la Meseta Central española, se construyen las series de frecuencias anuales correspondientes.

2.1. Definición de ola de calor

Como indica Robinson (2001), en la actualidad no hay una definición rigurosa de ola de calor (o frío). Normalmente este fenómeno extremo se asocia, no tanto a los valores de variables meteorológicas, esencialmente temperatura, como a los efectos que produce en los ecosistemas (Changnon et al., 2003; Khalio et al., 2005; Nogueira and Paixão, 2008). López-Díaz (2004) hace un estudio del comportamiento de las olas de calor usando sólo series largas de temperatura obtenidas en diversos observatorios de la España peninsular, y pone de manifiesto las dificultades que existen para determinar su tendencia, entre ellas la necesidad de utilizar umbrales variables. Todo ello hace que, normalmente, las olas de calor se estudien en la época cálida del año aunque puedan observarse olas de calor a lo largo de todo el año.

El estudio del comportamiento temporal de la frecuencia anual de olas de calor requiere una definición en función de las mismas variables climáticas durante todo el año, al margen de los efectos producidos sobre los ecosistemas. Como ya se ha indicado, las variables que vamos a considerar son las ATMAD y ATMID, y se considerará que existe una ola de calor cuando ambas variables superen los umbrales determinados por el percentil 90 durante dos días consecutivos como mínimo. Los umbrales que se consideran son los que corresponden a las series completas de ATMAD y ATMID, series en las que la estacionalidad se ha eliminado al calcular las anomalías para cada uno de los días del año en todos los años de las series de datos.

Las olas separadas por un intervalo de un día se considerarán constituyentes de la misma ola cuando una de las dos variables, ATMAD o ATMID, supere su umbral en ese día intermedio; en este caso la duración de la ola será el número total de días. De la misma manera, a partir de los valores umbrales determinados por el percentil 95 se establece la serie de frecuencias de las olas de calor más intensas, que estarán incluidas en la serie anterior.

3. RESULTADOS

A partir de las series de días extremadamente cálidos, establecidas en función de los valores de los percentiles 90 y 95, se determinan, de acuerdo con su definición, las olas de calor y su duración en el intervalo de tiempo de estudio. Para ello hemos diseñado otro paquete de software que nos proporciona las olas de calor, y la duración de cada una de ellas, detectadas en el intervalo de tiempo considerado. Después se construyen las series de frecuencias anuales correspondientes sin diferenciarlas por su duración. Los resultados obtenidos se muestran gráficamente en las figuras 2 y 3.

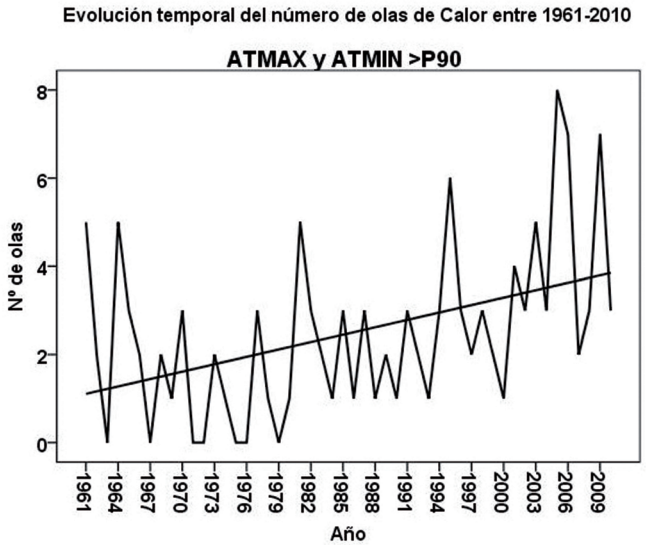

FIG. 2: *Evolución temporal de la frecuencia anual de olas de calor (P_{90}), en el periodo 1961-2010.*

El año con mayor frecuencia de olas de calor (P_{90}) es el 2005 (8) seguido del 2006 y 2007 (7).

En el caso de las olas más intensas (P_{95}), los años con mayor frecuencia son 1964, 2007 y 2009. En 1964, todas las olas detectadas fueron intensas.

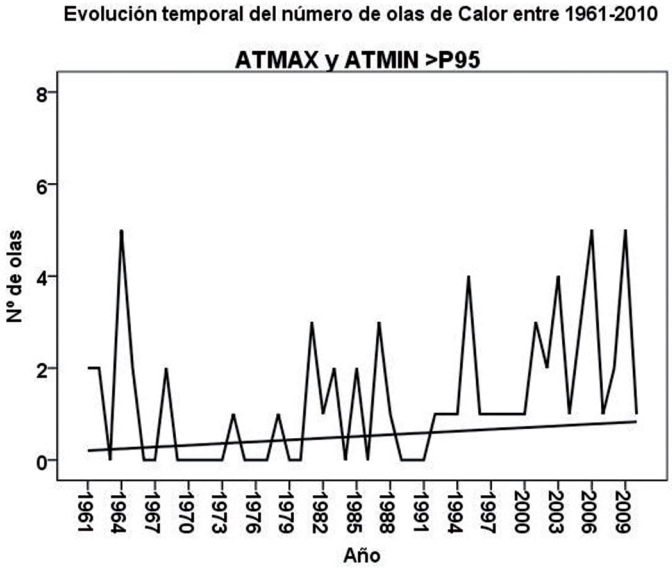

FIG. 3: *Evolución temporal de la frecuencia anual de olas intensas de calor (P_{95}), en el periodo 1961-2010.*

El número total de olas de calor durante el periodo de estudio en la Meseta Central española es de 124, de las cuales 66 fueron más intensas. Su distribución en cada uno de los meses del año se muestra en la tabla 2.

	Nº total de Olas de Calor en cada uno de los meses del año, entre 1961 y 2010											
	En	**Fe**	**Mz**	**Ab**	**Ma**	**Ju**	**Jl**	**Ag**	**St**	**Oc**	**No**	**Dc**
P_{90}	**1**	3	9	14	**25**	23	8	14	8	8	3	8
P_{95}	**0**	2	2	8	**18**	16	2	4	4	4	2	2

Tabla 2: *Nº total de olas de calor detectadas entre 1961 y 2010, para los umbrales P_{90} y P_{95}, en cada uno de los meses del año.*

Los resultados que se muestran en la tabla 2 indican que los meses con mayor número de olas de calor (P_{90}) son los de Mayo (25) y Junio (23). Le siguen Abril (14) y Agosto (14). Durante el periodo de estudio, salvo en Enero, Febrero y Noviembre, el número de olas de calor mensuales detectadas son 8 o más. Los casos más intensos (P_{95}) siguen la misma pauta aunque en menor número, y los meses con mayor número de eventos son Mayo (18), Junio (16) y Abril (8).

La duración de las olas de calor en la Meseta Central, durante el periodo de estudio, varía en un intervalo relativamente grande, desde 2 días hasta más de 10. El número de olas en cada caso se muestra en la tabla 3.

	Duración de las olas de frío (nº de días)									
	2	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**	**>10**
Nº de casos	**49**	37	18	6	6	2	1	2	1	**2**

Tabla 3. *Distribución de las olas de calor por su duración (1961-2010).*

Las gráficas de la figura 2 incluyen las líneas de tendencia establecidas con un modelo lineal. Tanto en el caso más general como en el caso de las olas más intensas la tendencia que indican las líneas es creciente. Para determinar si las tendencias que se observan en las dos gráficas son significativas, al menos a un nivel de significación del 95%, se aplica el test de Spearman (Sneyers, 1975) a las dos series de frecuencias anuales de olas de calor. En la tabla 4 se muestran los resultados obtenidos.

	Umbral P_{90}	**Umbral P_{95}**
r_S	0,417	0,371
α	0,003**	0,008**
Nº datos	50	50
Tendencia	C	C

(**) Nivel de significación > 99%. C= tendencia creciente.

Tabla 4: *Tendencia de las frecuencias anuales de olas de calor (P_{90}), y de las más intensas (P_{95}), entre 1961 y 2010.*

Los resultados de la aplicación del test de Spearman indican que la frecuencia anual de olas de calor en la Meseta Central española tiene una tendencia creciente, al igual que la frecuencia de las olas más intensas, a un nivel de significación muy alto.

Considerando un modelo lineal de comportamiento temporal de la frecuencia de las olas de calor [Fr(C)] en la Meseta Central durante el intervalo 1961-2010, la ecuación del modelo, considerando la unidad de tiempo el año, será Fr(C)] = 0,056 * año -1,052, lo que indica que el posible incremento de la frecuencia anual de olas de calor sería del orden de 0.6 olas por década.

4. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos permiten establecer, entre otras, las siguientes conclusiones:

El número total de olas de calor detectadas entre 1961 y 2010, de acuerdo con las condiciones establecidas, es de 124, de las cuales algo más de la mitad, 66, han sido intensas.

La serie de frecuencias anuales de olas de calor presenta una variabilidad relativamente grande, al igual que sucede en el caso de las más intensas. La mayor frecuencia anual en el intervalo de estudio se corresponde al año 2005 con 8 olas detectadas, seguido de los años 2006 y 2009 con 7. Los años en los que no se han detectado olas de calor son 1963, 1967, 1971, 1972, 1975, 1976 y 1976.

Entre 1961 y 20010 se detectan olas de calor en todos los meses del año. Los meses con menos olas de calor detectadas son los de Enero (1), Febrero (3) y Noviembre (3), como era de esperar. Los meses del año que presentan mayor número de olas de calor detectadas son los de Mayo y Junio, seguidos de Abril y Agosto. Las olas de calor más intensas se producen en los meses de Mayo y Junio. En el resto de los meses el número de olas de calor intensas es bastante menor.

El análisis de tendencia de las series de frecuencias anuales de olas de calor que afectan a la Meseta Central española, en el intervalo de tiempo estudiado, establece la existencia de una tendencia creciente en el periodo de estudio, y lo mismo sucede con la frecuencia de las más intensas. Un posible modelo lineal de comportamiento de las frecuencias anuales de olas de calor indica que el incremento esa frecuencia es del orden de 0,6 olas por década.

De todo lo expuesto se puede llegar a concluir, de forma general, que la frecuencia anual de olas de calor en la MC española ha experimentado un ligero incremento. Esto es lo que cabría esperar en concordancia con las tendencias de temperaturas máximas y mínimas diarias. En posteriores estudios se tratará de establecer y confirmar el comportamiento de las olas de calor y frío en áreas más pequeñas y para diferentes épocas del año.

Agradecimientos

Este trabajo se ha realizado en el marco del proyecto de investigación CGL2009-08565 financiado por el MICINN. Los autores agradecen a la AEMET las facilidades dadas para la obtención de los datos que han permitido realizarlo.

REFERENCIAS

Baldi M., Dalu G., Maracchi G.P., Pasqui M. and Cesarone F. (2006) Heat Waves in the Mediterranean: A Local Feature or a Larger-Scale Effect? *Int. J. of Climatol.* **26**: 1477–1487

Brunetti M., Maugeri M., Nanni T. (2001). Changes in total precipitation. Rainy days and extreme events in northeastern Italy. *Int. J. of Climatol,* **21**:861-871

Changnon D., Sandstrom M., Schaffer C. (2003). Relating changes in agricultural practices to increasing dew points in extreme Chicago heat waves. *Clim. Res.*, **24**: 243–254.

Domonkos P., Kyselý J., Piotrowicz K., Petrovic P. and Likso P. (2003). Variability of extreme temperature events in South-Central Europe during the 20th century and its relationship with large-scale circulation. *Int. J. of Climatol.*, **23**: 987-1010.

DeGaetano A.T. and Allen R.J. (2002) Trends in Twentieth-Century Temperature Extremes across the United States. *Journal of Climate*, **15:** 3188-3205.

Griffiths G.M., Salinger M.J. and Leleu I. (2003). Trends in extreme daily rainfall across the south Pacific and relationship to the south Pacific convergence zone. *Int. J.of Climatol*, **23**: 847-869.

Jones P.D. and Hulme M. (1996). Calculating regional climate times series for temperature precipitation: Methods and illustrations. *Int. J.of Climatol.*, **16**: 361-377.

Khaliq M.N., St-Hilaire A., Ouarda T.B.M.J. and Bobée B. (2005). Frequency Analysis and Temporal Pattern of Occurrences of Southern Quebec Heat Waves. *Int. J. of Climatol.* **25**: 485–504.

Klein, A.M.G. and Können G.P. (2003). Trends in Indices of Daily Temperature and Precipitation Extremes in Europe, 1946-99. *Journal Climate,* **16**: 3665-3680.

Kyselý J. (2002) Temporal Fluctuations in Heat Waves at Prague-Klementinum, the Czech Republic, from 1901–97, and their Relationships to Atmospheric Circulation. *Int. J.of Climatol.* **22**: 33–50.

Labajo J.L., Martín Q., Piorno A., Labajo A.L., Morales C., y Ortega M.T. (2004). Primeros resultados del análisis del comportamiento de los valores extremos de la presión atmosférica, a nivel del suelo, en Castilla y León. En *El Clima entre el Mar y la Montaña*. García Codrón.

J.C., Diego C.; Fernández de Arróyabe P., Garmendia C. y Rasilla D. (Eds.), Publicaciones de la AEC, Serie A, nº 4 , 313-321.

Labajo J.L., Labajo A.L., Martín Q., Piorno A., Morales C. y Ortega M.T. (2006). Análisis del comportamiento reciente de los valores extremos de temperatura en la zona Madrid-Castilla La Mancha. En *Clima, Sociedad y Medio Ambiente.* Cuadrat J.M., Saz M.A., Vicente S.M., Lanjeri S., De Luis M. y González J.C. (Eds.), Publicaciones de la AEC, Serie A, nº 5 , 157-165.

Labajo J.L., Martín Q., Labajo A.L., Piorno A., Ortega M.T., y Morales C. (2008). Recent Trends in the Frequencies of Extreme Values of Daily Maximum Atmospheric Pressure at Ground Level in the Central Zone of the Iberian Peninsula. *Int. J. of Climatol.*, **28**:1227-1238.

Labajo A.L y Labajo J.L. (2010). Evolución de la frecuencia anual de los días extremadamente fríos en época fría, entre 1961 y 2003, en la Meseta Central española En *Clima, Ciudad y Ecosistemas.* F. Fernández, E. Galán y R. Cañada (Eds.), Publicaciones de la AEC, Serie A, nº 7, 151-159.

López-Díaz J.A. (2004). Análisis de tendencias en olas de calor a partir de series largas de temperatura. En *El Clima entre el Mar y la Montaña*. García Codron, J.C. Diego Liaño, C.; Fdez. de Arróyabe Hernáez, P.; Garmendia Pedraja, C. y Rasilla Álvarez, D. (Eds.). Publicaciones de la AEC, serie A, nº 4, 347-354.Manton M.J., Della-Marta P.M., Haylock M.R., Hennessy K.J., Nicholls N., Chambers L.E., Collins D.A., Daw G., Finet A., Gunawan D., Inape K., Isobe H., Kestin T.S., Lefale P., Leyu C.H., Lwin T., Maitrepierre L., Ouprasitwong., Page C.M., Pahalad J.,; Plummer N., Salinger M.J., Suppiah R.,; Tran V.L., Trewin B., Tibig I. and Yee D. (2001). Trends in extreme daily rainfall and temperature in Southeast Asia and the South Pacific: 1961-1998. *Int. J. of Climatol.*, **21**, 269-284.

Nogueira P. and Paião E. (2008). Models for mortality associated with heat waves: update of the Portuguese heat health warning system . *Int. J. of Climatol.* **28**: 545–562.

Ortega M.T., Morales C., Labajo J.L., Labajo A.L., Piorno A. y Martín Q. (2006). Tendencias recientes en las frecuencias de los valores extremos de temperatura en la región de Castilla y León. En *Clima, Sociedad y Medio Ambiente.* Cuadrat J.M., Saz M.A., Vicente S.M., Lanjeri S., De Luis M., y González J.C. (Eds.), Publicaciones de la AEC, Serie A, nº **5** , 251-259.Robinson P.J. (2001). On the Definition of a Heat Wave. *Journal of Applied Meteorology*, **40**, 762-775.

Salinger M.J. and Griffiths G.M. (2001). Trends in New Zealand daily temperature an rainfall extremes. *Int. J. of Climatol.*, **21**, 1437-1452.

Sneyers R. (1975). *Sobre el análisis estadístico de las series de observaciones*. OMM, Nota Técnica 143, OMM-Nº415. 192 pp.