

# TENDENCIA DE LAS FRECUENCIAS DE LAS OLAS DE FRÍO EN LA MESETA CENTRAL ESPAÑOLA, ENTRE 1961 Y 2010

Ángel L. LABAJO IZQUIERDO<sup>1</sup>, Quintín MARTÍN MARTÍN<sup>3</sup>, Juan LABAJO MONTERO<sup>4</sup>, Moisés EGIDO MANZANO<sup>2</sup> y José L. LABAJO SALAZAR<sup>2</sup>.

<sup>1</sup>*Departamento de Informática y Automática. Universidad de Salamanca.*

<sup>2</sup>*Departamento de Física General y de la Atmósfera. Universidad de Salamanca.*

<sup>3</sup>*Departamento de Estadística. Universidad de Salamanca.*

<sup>4</sup>*Grupo Geoclima. Universidad Autónoma de Madrid.*

alabajo@usal.es, qmm@usal.es, juan\_labajo@hotmail.com, moi95@usal.es, jll45@usal.es

## RESUMEN

A partir de las series de datos diarios de anomalías de temperatura máxima (ATMAD) y mínima (ATMID), se analiza el comportamiento de las olas de frío detectadas en ella durante el periodo 1961-2010. En función de los valores umbrales de ATMAD y ATMID determinados por el percentil  $P_{10}$  de las series de trabajo se establecen los días extremadamente fríos. Se define una ola de frío como una sucesión de dos o más días consecutivos en los que las ATMAD y ATMID son inferiores, simultáneamente, a los umbrales establecidos. Se identifican las olas de frío en el intervalo de estudio y se determinan sus frecuencias mensuales y anuales. Los resultados obtenidos indican que en todos los meses del año ocurren olas de frío en número que oscila entre 8 y 16 olas. Los meses de menor número son Abril (9), Julio (8) y Agosto (9). Los años con mayor número de olas de frío son 1969, 1971 y 1977 con 7 casos, el resto de los años, la frecuencia anual está comprendida entre 1 y 6. El análisis de tendencia de la serie de frecuencias anuales indica que existe una tendencia decreciente de las olas de frío a un nivel de confianza del 99%. Si se considera un modelo lineal, en la Meseta Central española se ha producido, entre 1961 y 2010, una disminución de olas de frío del orden de 0,54 olas cada 10 años.

**Palabras clave:** Temperatura máxima, temperatura mínima, ola de frío, frecuencia, tendencia.

## ABSTRACT

From the series of daily data of anomalies of maximum temperature (ATMAD) and minimum temperature (ATMID), the behavior of cold waves detected in it during the period 1961-2010 is analyzed. Extremely cold days are established based on the thresholds values for ATMAD and ATMID determined by the  $P_{10}$  percentile of the work series. Defines a cold wave as a succession of two or more consecutive days in which the ATMAD and ATMID are below, at the same time, to the established thresholds. The waves of cold in the interval of study are identified and their monthly and annual frequencies are determined. The results indicate that cold waves occur in every month of the year in number between 8 and 16 waves. The months in which fewer cold waves are detected are April (9), July (8) and August (9). The years with most cold waves are 1969, 1971 and 1977 with 7 cases, the rest of the years the annual prevalence is between 1 and 6. Analysis of trend of the series of annual frequencies indicates that there is a decreasing trend of cold waves at a 99% confidence level. If a linear model is considered, in the Spanish Central

Plateau has been, from 1961 to 2010, a decrease of cold waves on the order of 0.54 waves every 10 years.

**Keywords:** Maximum temperature, minimum temperature, cold wave, frequency, trend

## 1. INTRODUCCIÓN

En la última década, después de analizado el comportamiento de los valores medios de las variables climáticas, y de acuerdo con las sugerencias realizadas en los dos últimos informes del IPCC, los estudios sobre el cambio climático se están centrando en el estudio del comportamiento de sus valores extremos y de la fenomenología atmosférica asociada a ellos (Plummer et al., 1999; Griffiths et al., 2003; Labajo *et al.*, 2004 y 2008). Las variables que están siendo analizadas más minuciosamente son la temperatura y la precipitación (Manton *et al.*, 2001; Salinger y Griffiths, 2001; Klein y Können, 2003).

Por otra parte, el comportamiento temporal de los valores extremos diarios de temperatura se han estudiado a distintas escalas espaciales (De Gaetano *et al.*, 2002; Domonkos *et al.*, 2003; Ortega *et al.* 2006), estableciéndose las condiciones para determinar los días extremadamente cálidos o fríos (Labajo y Labajo, 2010; Yaquing and Gouyu, 2011). Dada la incidencia que los fenómenos extremos, y en concreto los altos valores de temperatura, pueden tener en los ecosistemas y, especialmente en la actividad humana, se ha dado especial importancia al estudio de la tendencia de la frecuencia de los eventos de frío y calor extremo (olas de frío y calor) (Kyselý, 2002; Kyselý and Martin, 2005; Khaliq et al., 2005; Baldi *et al.*, 2006).

En este trabajo se van a establecer las condiciones para que una sucesión de días con temperaturas máximas y mínimas diarias suficientemente bajas pueda considerarse como una ola de frío, desde un punto de vista estrictamente climatológico como en el caso de las olas de calor. Se va a analizar el comportamiento temporal de la frecuencia anual de producción de las olas de frío en la Meseta Central española entre 1961 y 2010 y se va a determinar su tendencia.

## 2. DATOS Y METODOLOGÍA

La zona de estudio seleccionada es la Meseta Central española, constituida por las comunidades autónomas de Castilla y León, Madrid y Castilla la Mancha. Su extensión dentro de la península Ibérica cubre un área comprendida entre las latitudes 38° 01' N y 43° 14' N y las longitudes 0° 54' W y 06° 07' W (Fig.1). Los datos empleados para este estudio son datos de observación de temperaturas máxima y mínima diarias, proporcionados por la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET), y obtenidos en los observatorios de Ávila, Burgos, León, Salamanca, Segovia, Soria, Valladolid (Villanubla), Zamora, Madrid (Retiro), Barajas (Madrid), Los Llanos (Albacete), Ciudad Real, Cuenca y Toledo, 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 entre el dato diario de las series y el correspondiente valor medio obtenido para cada uno de los días del año. La principales ventajas de usar series de anomalías en lugar de las series de datos de observación son, en primer lugar que se elimina la necesidad de reducir los datos a un nivel de referencia determinado y en segundo lugar que se corrige la

estacionalidad. En consecuencia las series así obtenidas permiten realizar un análisis válido del comportamiento de los DEF a lo largo de todo el año en la zona de estudio, y establecer las olas de frío que se pueden producir en cada uno de los meses.

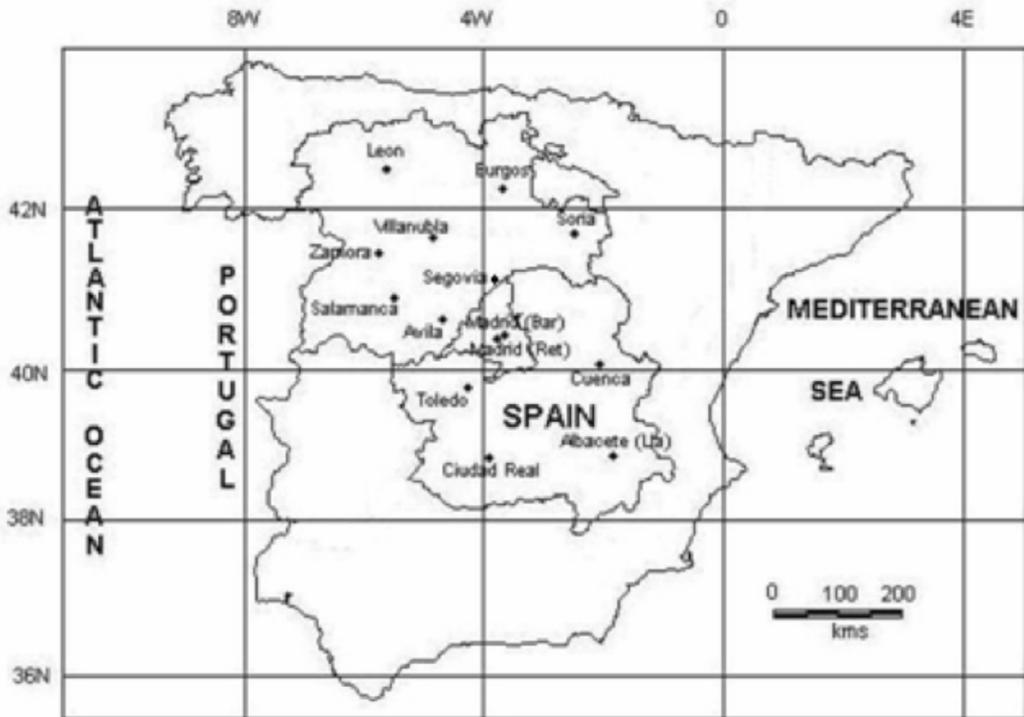


FIG. 1: Zona de Estudio

A partir de las series de anomalías de cada uno de los observatorios seleccionados se construyen las series regionales de anomalías de temperaturas máximas y mínimas diarias en la Meseta Central española, utilizando el método del inverso de la distancia (Jones y Hulme, 1996). Estas series se han obtenido y testado en trabajos anteriores (Labajo *et al.*, 2006). Con las series de ATMAD y ATMID se van a determinar los valores umbrales que sirven para determinar si un día es extremadamente frío (DEF). Para ello se va a aplicar el criterio de los percentiles que, de acuerdo con la bibliografía consultada, parece ser el más empleado para determinar umbrales de valores extremos de variables climáticas (De Gaetano y Allen, 2002; Griffiths *et al.*, 2003; Labajo *et al.*, 2004, 2006 y 2008).

De acuerdo con Labajo y Labajo (2010), se consideran DEF a los días en los que los valores de ATMAD y ATMID, en las series de trabajo, sean inferiores, simultáneamente, a los valores umbrales establecidos por los percentiles 05 ( $P_{05}$ ) de ambas series. Para establecer las olas de frío el considerar los umbrales determinados por el  $P_{05}$  puede ser excesivamente restrictivo, por lo que consideraremos los umbrales definidos por el percentil 10 ( $P_{10}$ ) para determinar los días incluidos en una ola de frío (DF), utilizando los obtenidos con el  $P_{05}$  para determinar las olas de frío más intensas. Estos valores umbrales se muestran en la tabla 1

		ATMAD (°C)	ATMID (°C)
Percentiles	05 (P <sub>05</sub> )	-6,1133	-4,7862
	10 (P <sub>10</sub> )	-4,7294	-3,6834

TABLA 1: Valores umbrales de ATMAD y ATMID determinados por los P<sub>10</sub> y P<sub>05</sub> para las series completas

A partir de estos valores umbrales se van a determinar los días fríos (DF) y los DEF en la toda la zona de estudio, durante el intervalo 1961-2010. Ahora se considerará como DF aquel en el que los valores de ATMAD y ATMID sean inferiores simultáneamente a los umbrales determinados por el P<sub>10</sub>, y más intensos (DEF) los que sean inferiores a los umbrales determinado por P<sub>05</sub>. A partir de los resultados obtenidos se van a construir las series de frecuencias anuales correspondientes.

### 2.1. Definición de ola de frío

Al igual que en el caso de las olas de calor, no hay una definición general y rigurosa de las olas de frío (Robinson, 2001). En general se establece la existencia de una ola de frío, o de calor, por la incidencia que tiene en los distintos campos de las actividades humanas (Changnon et al., 2003; Nogueira and Paixão, 2008), y no tanto por los valores de las variables meteorológicas, fundamentalmente la temperatura. Las dificultades que se plantean para determinar su tendencia temporal (entre otras causas por la estacionalidad) parecen justificar su estudio exclusivamente en la época fría aunque se pueden detectar olas de frío durante todo el año.

Para el estudio del comportamiento temporal de las olas de frío, es necesario definir las en función de las mismas variables climáticas en todo el año, al margen de los efectos sobre los ecosistemas o la actividad humana. Los datos que vamos a considerar en este trabajo, como ya se ha indicado antes, son las series de ATMD y ATMID obtenidas de las series de datos diarios de temperatura máxima y mínima. Estas series de anomalías eliminan la estacionalidad, y su variabilidad es mucho más pequeña que la de los datos de temperaturas observadas, lo que va a permitir el hacer un estudio anual sin tener que restringir el análisis a la época fría.

Teniendo en cuenta estas consideraciones se establecerá la existencia de ola de frío cuando la ATMAD y la ATMID sean inferiores, simultáneamente, a los valores umbrales determinados por el P<sub>10</sub>, durante dos días consecutivos como mínimo. Dos o más olas de frío separadas por un intervalo de un día se considerarán constituyentes de la misma ola cuando una de las dos variables, ATMAD o ATMID, sea inferior al valor umbral correspondiente en ese día intermedio; en este caso la duración de la ola será el número total de días, incluidos los días intermedios. De la misma manera, a partir de los valores umbrales determinados por el P<sub>05</sub> se establece la serie de frecuencias de las olas de frío más intensas, que estarán incluidas en la serie anterior.

## 3. RESULTADOS

De acuerdo con la definición de olas de frío, a partir de las series de DF y DEF establecidas con umbrales determinados por los P<sub>10</sub> y P<sub>05</sub>, se determinan las olas de frío y su duración a lo largo de cada año del intervalo de estudio. Después se construyen las series de frecuencias

anuales, en cada caso, para el intervalo de estudio sin tener en cuenta su duración. La evolución temporal de las series de frecuencias anuales de olas de frío se muestra en las gráficas de las figuras 2 y 3

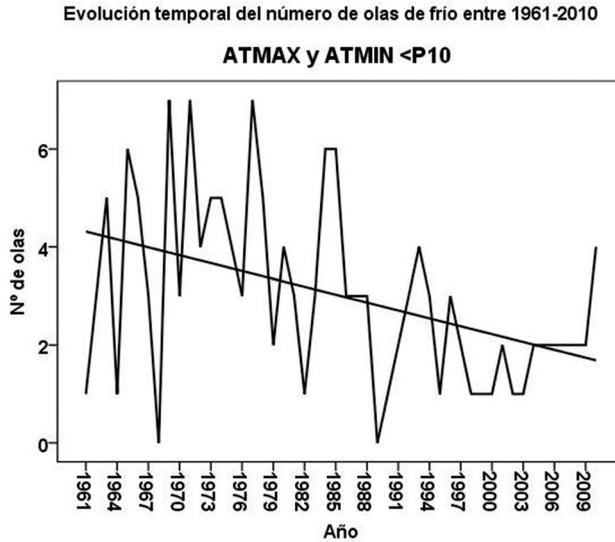


FIG. 2: Evolución temporal de la frecuencia anual de olas de frío ( $P_{10}$ ), en el periodo 1961-2010.

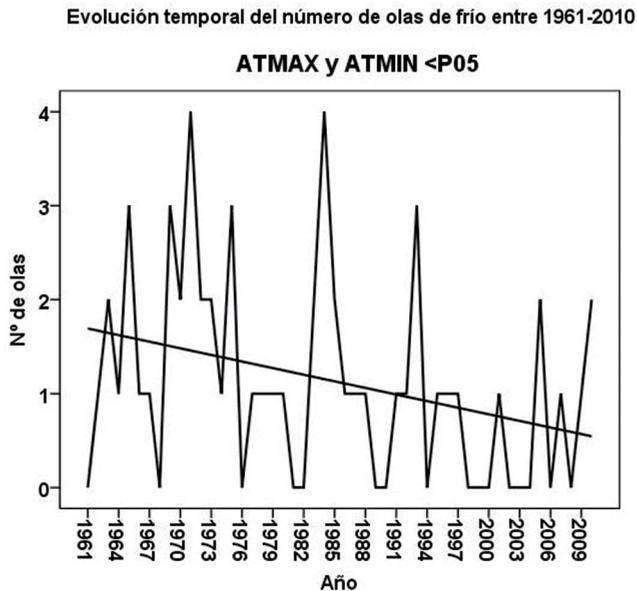


FIG. 3: Evolución temporal de la frecuencia anual de olas de frío intensas ( $P_{05}$ ), en el periodo 1961-2010.

El rango de frecuencias anuales de olas de frío, durante el intervalo de estudio, va desde 0 hasta 7 con máximos en 1969, 1971 y 1977, y mínimos en 1968 y 1989. Las olas más intensas presentan sus máximos de frecuencia anual (4 casos) en 1971 y 1984. El número total de olas de frío entre

1961 y 2010 fue de 150 de las cuales 56 fueron intensas. La distribución en los meses del año se muestra en la tabla 2

	<b>Nº Total de Olas de Frío en cada uno de los meses, entre 1961 y 2010</b>											
	<b>En</b>	<b>Fe</b>	<b>Mz</b>	<b>Ab</b>	<b>Ma</b>	<b>Ju</b>	<b>Jl</b>	<b>Ag</b>	<b>St</b>	<b>Oc</b>	<b>No</b>	<b>Dc</b>
$P_{10}$	11	14	16	9	16	16	8	9	15	16	10	10
$P_{05}$	4	7	8	4	7	6	3	0	9	4	0	4

TABLA 2: *Nº total de olas de frío en cada uno de los meses del año, entre 1961 y 2010, detectadas para los umbrales  $P_{10}$  y  $P_{05}$ .*

Los resultados mostrados en la tabla 2 indican que la distribución de las olas de frío a lo largo del año, durante el periodo de estudio, es bastante uniforme. El mayor número de casos (16) se producen en los meses de marzo, mayo, junio y octubre seguidos de Setiembre con 15 y febrero con 14. Los meses en los que las olas de frío son menos frecuentes son abril y agosto (9 casos) seguidos de noviembre, diciembre y enero con 10 y 11 casos respectivamente. En cuanto a las olas más intensas, se detectan en los meses de setiembre (9 casos), marzo (8casos) y febrero y mayo (7 casos). En los meses de agosto y noviembre no se detectan olas intensas.

La duración de las olas de frío detectadas entre 1961 y 2010 en la Meseta Central española, de acuerdo con los criterios establecidos para definir las, oscila entre 2 y más de 10 días. En la tabla 3 se da la distribución de las olas de frío de acuerdo con su duración.

	<b>Duración de las olas de frío (nº de días)</b>									
	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>&gt;10</b>
Nº de casos	73	39	21	6	4	1	1	3	0	2

TABLA 3: *Distribución de las olas de frío por su duración (1961-2010).*

De los 150 casos de olas de frío que se detectan en el intervalo de estudio, la mayor parte de ellos presentan una duración de 2 días. Las olas de más de 4 días de duración constituyen sólo el 11% del total, e incluyen 2 olas de más de 10 días de duración.

En las gráficas de distribución temporal de la frecuencia anual de olas de frío se incluyen las rectas de tendencia considerando un modelo lineal. En ambos casos parece existir una tendencia decreciente en la frecuencia de olas de frío en la Meseta Central española. Para ver si la tendencia que se aprecia en las gráficas es suficientemente significativa al menos a un nivel de confianza del 95%, con lo que el modelo lineal podría servir como modelo de pronóstico, se va a aplicar el test de Spearman (Sneyers, 1975) a las series de frecuencias de olas de frío ( $P_{10}$ ) y a la de las olas más intensas ( $P_{05}$ ). Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 4.

Estos resultados permiten considerar la posibilidad de establecer un modelo lineal como modelo de comportamiento temporal de la frecuencia anual de olas de frío [Fr(F)] en la Meseta Central española entre 1961 y 2010. La ecuación que se obtiene para el modelo, tomando como unidad de

tiempo el año es  $Fr(F) = -0,054 \cdot \text{año} + 4,367$ . Esto indica que existe una disminución en la frecuencia de producción de olas de frío durante el año del orden de 0,5 por década en el intervalo de tiempo de estudio.

	Umbral $P_{10}$	Umbral $P_{05}$
$r_s$	-0,419**	-0,320*
$\alpha$	0,002	0,023
Nº datos	50	50
Tendencia	D	D

(\*\*) Nivel de significación > 99%. (\*) Nivel de significación >95.

D= tendencia decreciente.

TABLA 4: Tendencia de las frecuencias anuales de las olas de frío en la meseta central española ( $P_{10}$ ), y de las más intensas ( $P_{05}$ ), entre 1961 y 2010.

#### 4. CONCLUSIONES

A lo largo del desarrollo de este trabajo se han obtenido diversos resultados que permiten establecer, entre otras, las siguientes conclusiones:

El número total de olas de Frío detectadas entre 1961 y 2010 en la Meseta Central española, de acuerdo con las condiciones establecidas en su definición, es de 150 de las cuales 56 han sido intensas.

La variabilidad de la frecuencia anual de las olas de frío oscila entre 7 y 0. En el caso de las olas más intensas la variabilidad de la frecuencia anual disminuye. Sólo hay dos años en los que no se detectan olas de frío en el área de estudio, 1968 y 1989. En el caso de las más intensas, el número de años en los que no se detecta ninguna se incrementa.

A lo largo del periodo de estudio se detectan olas de frío en todos los meses del año con una distribución bastante uniforme. Los meses con más olas de frío son los de marzo, mayo, junio y octubre en los que se totalizaron 16 olas de frío en cada uno. Los meses con menos olas son julio con 8 seguido de agosto y abril con 9. Las olas más intensas presentan una distribución similar. El mes con mayor número de olas de frío intensas es setiembre con 9. Los meses que en los que no se detectan olas de frío intensas son agosto y noviembre.

Del análisis de tendencia de las series de frecuencias anuales de olas de frío que se detectan en la Meseta Central española entre 1961 y 2010 se deduce la existencia de una tendencia decreciente a un nivel de significación muy alto, superior al 99%, y en el caso de las olas más intensas del orden del 97,7%. La cuantía de ese decrecimiento se establece mediante un modelo lineal que indica que la disminución de la frecuencia anual de olas de frío es del orden de 0,5 por década.

Todo lo expuesto anteriormente indica que la frecuencia de olas de frío, tanto intensas como no, en la Meseta Central española ha disminuido algo como cabría esperar en concordancia con las tendencias de las temperaturas máximas y mínimas diarias. Este trabajo se va a complementar con la cuantificación de la intensidad de las olas y el análisis de su comportamiento temporal. Además, en posteriores estudios se tratará de establecer el comportamiento temporal de las frecuencias de las olas de frío, en regiones 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
- Domonkos P., Kysely J., Piotrowicz K., Petrovic P. and Likso P. (2003). Variability of extreme temperature events in South-Central Europe during the 20<sup>th</sup> century and its relationship with large-scale circulation. *Int. J. of Climatol.*, **23**: 987-1010.
- De Gaetano 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 time 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.
- Kysely 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.
- Kysely J. and Dubrovsk M. (2005). Simulation of extreme temperature events by a stochastic weather generator effects of interdiurnal and interannual variability reproduction. *Int. J. of Climatol.*, **25**: 251-269.
- 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.
- 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 and 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.
- Yaquing Z., Gouyu R. (2011). Change in extreme temperature event frequency over mainland China, 1961-2008. *Climate Research*, **50**: 125-139.

