

*Los extremos térmicos en
el litoral mediterráneo:
evolución y factores de
forzamiento*

Javier Sigró Rodríguez

Centro en Cambio Climático (C3),
Universitat Rovira i Virgili
javier.sigro@urv.cat

Manola Brunet India

Centro en Cambio Climático (C3),
Universitat Rovira i Virgili
Climate Research Unit, University
of East Anglia
manola.brunet@urv.cat

Enric Aguilar Anfrons

Centro en Cambio Climático (C3),
Universitat Rovira i Virgili
enric.aguilar@urv.cat

LOS EXTREMOS TÉRMICOS EN EL LITORAL MEDITERRÁNEO: EVOLUCIÓN Y FACTORES DE FORZAMIENTO

Javier Sigró Rodríguez
Manola Brunet India
Enric Aguilar Anfrons

RESUMEN: A partir de series temporales de temperatura máxima y mínima diaria de 6 observatorios de largo recorrido situados en el litoral mediterráneo de la Península Ibérica, se han obtenido diversos índices basados en percentiles con objeto de caracterizar la evolución de los extremos de temperatura en esta región. Dichos índices indican una significativa disminución en el número de días y noches fríos, al mismo tiempo que un creciente número de días supera el umbral definido para las noches y días cálidos. Los mayores incrementos/decrementos se producen durante la estación estival, y han experimentado un robusto incremento en las tendencias a partir de inicios de los años 70.

La relación de estos extremos térmicos con factores de forzamiento atmosférico y marino apunta a la temperatura superficial del Mar Mediterráneo Occidental como el principal factor de forzamiento asociado a los cambios en los extremos de temperatura. Las series analizadas permiten explicar porcentajes de la variabilidad de las series de extremos que llegan a superar el 50% durante la estación estival, cuando más fuerte es la relación entre la señal marina y los extremos térmicos.

PALABRAS CLAVE: cambio climático, extremos de temperatura, teleconexiones, temperatura superficial del mar.

ABSTRACT: Extreme temperature indices on the Spanish Mediterranean coast were assessed by employing long daily maximum and minimum temperature time series corresponding to six stations located in this area. The analysis indicates a significant decrease in the number of cold days and nights. Likewise, there is an increase in the number of days exceeding the thresholds defined for characterising warm nights and days. The largest increases/decreases have taken place during the summer season, particularly from early-1970s onwards.

The relationships between the extreme indices and atmospheric patterns of variability together with Western Mediterranean sea surface temperatures were established. The sea surface temperature was detected as the principal forcing factor, explaining up to 50% of the variability during summer, while the relationship between the estimated temperature extreme indices was the strongest.

KEYWORDS: climate change, temperature extremes, teleconnections, surface sea temperature.

1. Introducción

La creciente preocupación ante las implicaciones del cambio climático debido a sus efectos sobre el medio físico, económico y social ha llevado al aumento del interés sobre la evolución reciente de diversas variables climatológicas, entre ellas la temperatura del aire como principal indicador del sistema climático, tanto a escala planetaria como regional o local.

La ocurrencia de acontecimientos meteorológicos extremos es especialmente preocupante por sus efectos negativos sobre la salud humana (grupos de riesgo, golpes de calor, enfermedades infecciosas), el medio natural (erosión, incendios forestales, efectos sobre las comunidades bióticas) o sobre las actividades socio-económicas (daños en infraestructuras, suministro de agua).

Ante una situación de calentamiento global urge conocer cuál es la evolución que están experimentando los extremos climáticos, si se están produciendo cambios en su distribución de frecuencia, y cuáles son los factores de forzamiento que actúan sobre dichos acontecimientos. En este contexto, en los últimos años se ha realizado un importante esfuerzo por parte de la comunidad científica para ahondar en el conocimiento de la ocurrencia y mecanismos de los extremos climáticos.

A escala europea, Klein-Tank *et al.* (2002) -en el marco del proyecto ECA&D- analizaron 5 estaciones de temperatura españolas entre las 199 utilizadas para el conjunto europeo, destacando desde 1976 un incremento significativo en el número de días y noches calidas, así como una reducción significativa en la ocurrencia de días y noches frías. Con un conjunto de obser-

vaciones de carácter secular, entre ellas 22 españolas, Moberg *et al.* (2006) estudian la evolución de extremos termoplumiométricos europeos en el marco del proyecto europeo EMULATE¹. En concreto, la evolución de los percentiles 02 y 98 de la temperatura máxima diaria y la temperatura mínima diaria indican tendencias significativas al incremento térmico para el periodo 1901-2005, especialmente relevantes en la Península Ibérica durante el verano, con incrementos superiores a los 2,5°C en el percentil 02 de la temperatura máxima, los mayores detectados para el conjunto europeo.

Recientes estudios detallan los cambios en las olas de calor estival en la Europa Occidental (Della Marta *et al.*, 2007), así como cambios en la función de densidad de probabilidad de la temperatura máxima diaria y de la frecuencia de los extremos de las temperaturas estivales (Della Marta *et al.*, 2007b).

En el marco de la Península Ibérica (PI), Rodríguez Puebla *et al.* (2004) señalan el incremento producido en el número de días cálidos estivales en la segunda mitad del siglo XX, especialmente acentuado desde principios de la década de los 70. Brunet *et al.* (2007a) cuantifican, para el periodo 1850-2005, en 0,74 días/década la reducción del número de días fríos y 0,54 días/década la disminución en las noches frías. Por el contrario, los días cálidos se incrementan en 0,53 días/década y las noches cálidas en 0,49 días/década.

La relación entre extremos térmicos, persistencia de extremos cálidos y su efecto sobre la salud se describe para Madrid en García Herrera *et al.* (2002) y García Herrera *et al.* (2005), donde para incrementos por encima del umbral de los 36 °C, cada

¹ European and North Atlantic daily to MULTidecadal climATE variability: <http://www.cru.uea.ac.uk/cru/projects/emulate>

incremento en 1°C produce incrementos en la mortalidad del 21%. Prieto *et al.* (2004) analizan el impacto de las noches extremadamente frías durante los 5 meses más fríos del año para el periodo 1958-2003.

La ocurrencia de eventos extremos cálidos y fríos en la PI y su relación con la circulación atmosférica se ha abordado en diversos trabajos. García Herrera *et al.* (2005) examina las diferentes condiciones sinópticas que generan días extremadamente cálidos en Lisboa y Madrid, mientras que la relación no lineal de la NAO con los días extremadamente fríos se describe en Prieto *et al.* (2002). Pereira *et al.* (2008) analizan las temperaturas extremas de la segunda mitad del siglo XX en Lisboa indicando una disminución de las noches frías estivales en relación con la mayor ocurrencia de situaciones anticiclónicas en el norte de África que favorecen el aporte de aire cálido y seco en la PI.

En la fachada mediterránea de la PI, Miró *et al.* (2006) señalan un incremento en la persistencia de días cálidos en el verano de la región valenciana, especialmente los meses de Julio y Agosto, relacionándolo con la temperatura superficial del Mar Mediterráneo en las costas valencianas. La evolución de los índices de extremos térmicos a escala anual en el litoral mediterráneo se aborda para el periodo 1901-2005 por Sigró *et al.* (2008), mostrando tendencias en los índices de extremos térmicos con reducciones (incrementos) significativas en los extremos fríos (cálidos) diurnos y nocturnos, con una mayor contribución al calentamiento atribuida en el Mediterráneo al incremento en las noches cálidas, tendencias que se robustecen notablemente durante las últimas 3 décadas.

El presente trabajo tiene como objetivo el análisis de la evolución de los extremos térmicos en el litoral mediterráneo, el área que ha experimentado un mayor incremento

de la temperatura del aire en las últimas décadas, y su relación con factores de forzamiento de carácter atmosférico o marino.

Para ello este trabajo se divide en la presente sección introductoria y en las siguientes: en la segunda sección se detalla la metodología utilizada; en la tercera parte se describe la evolución de los índices de extremos térmicos y se analizan las tendencias calculadas para dichos índices; en la cuarta se explora la relación con los factores de forzamiento; la quinta y sexta parte del artículo recogen respectivamente las conclusiones y la bibliografía utilizada.

2. Metodología y datos

Para la extracción de los índices de extremos térmicos se han utilizado los registros de la temperatura máxima y mínima diaria de seis observatorios (Albacete, Alicante, Barcelona, Málaga, Murcia y Valencia), controladas de calidad y homogeneizadas, procedentes de la base de datos *Spanish Daily Adjusted Temperature Series* (SDATS) del Centro en Cambio Climático (C3) de la Universidad Rovira i Virgili (Brunet *et al.*, 2006, 2008) para el periodo 1901-2005. Estos observatorios se distribuyen de manera homogénea por el conjunto del litoral mediterráneo de la PI (Fig. 1) y permiten una representación razonable de éste ámbito desde la perspectiva de los campos térmicos.

La definición de extremos climáticos presenta diferencias remarcables entre investigadores según su delimitación en función de efectos sobre la salud o sobre el medio, o por su interés como indicadores del cambio climático para definirlos. En este trabajo hemos optado por este último enfoque, utilizando algunos de los índices definidos por el *Expert Team on Climate Change Detection and Indices* (ETCCDI:

<http://cccma.seos.uvic.ca/ETCCDI/>) para la caracterización de extremos térmicos. Se han seleccionado en concreto los siguientes índices, que proporcionan información sobre los eventos extremos de carácter moderado: días cálidos (TX90, número de días/año en que se supera el percentil 90 de la temperatura máxima diaria); días fríos (TX10, número de días/año en que no se supera el percentil 10 de la temperatura máxima diaria); noches cálidas (TN90,

número de días/año en que se supera el percentil 90 de la temperatura mínima diaria); y noches frías (TN10, número de días/año en que no se supera el percentil 10 de la temperatura mínima diaria). Con objeto de examinar también el comportamiento de los episodios más extremos, se han calculado también los índices correspondientes a días y noches extremadamente cálidas o frías (TX98, TN98, TX02, TN02).



Fig. 1. Localización de los observatorios del litoral mediterráneo pertenecientes a la base de datos SDATS.

Para su cálculo se ha utilizado el programa informático *EMULATE Extremes indices Software* generado en el marco del proyecto *European and North Atlantic daily to MULTidecadal climate variability* (EMULATE) desarrollado por Walther (2004) para el cálculo de índices de extremos termopluviométricos a escala estacio-

nal. Este programario incorpora además el procedimiento de corrección “*Bootstrap*” propuesto por Zhang *et al.* (2004) para evitar la introducción artificial de inhomogeneidades al principio y final del periodo base usado para el cálculo de los índices basados en percentiles.

Los índices de los extremos analizados se han generado individualmente para cada uno de los 6 observatorios a partir de las series estacionales construidas con la temperatura máxima y mínima diarias. Posteriormente se han integrado en una única serie regional representativa del conjunto del territorio analizado mediante una serie promedio ponderada según el algoritmo descrito por Jones y Hulme (1996).

La estimación de las tendencias de las series de índices para el periodo completo y los diversos subperíodos establecidos por Brunet *et al.* (2007a), en función de su comportamiento térmico diferenciado, se ha calculado mediante el estimador robusto de tendencias no paramétrico de Sen (1968), aplicado de forma similar a la realizada por Zhang *et al.* (2000).

Con el objetivo de analizar las relaciones entre las series de índices de extremos de temperatura en el litoral mediterráneo y diversos factores de forzamiento atmosférico y marino, se ha optado por examinar las correlaciones con la Oscilación del Atlántico Norte (North Atlantic Oscillation; NAO), como primer modo de variabilidad atmosférica en el Atlántico y Europa (Barnston y Livezey, 1987) y un patrón de variabilidad más centrado en el Mediterráneo como es la Oscilación del Mediterráneo Occidental (Western Mediterranean Oscillation; WeMO). Para representar la temperatura superficial del Mediterráneo Occidental se ha escogido la base de datos HadSST2 (Rainer *et al.*, 2006) proporcionada por la *Climate Research Unit* de la Universidad de East Anglia (Reino Unido).

En concreto se ha utilizado el índice NAO, principal modo de variabilidad atmosférica del Atlántico Norte, definido por Hurrell (1995) como la diferencia normalizada entre Ponta Delgada y Reykjavik para la estación invernal y el

índice NAO definido por Jones *et al.* (1997) como la diferencia normalizada entre Gibraltar y Reykiavik el resto de las estaciones. El índice de la WeMO -definido por Martín Vide y López Bustins (2006)- corresponde a la diferencia de presión normalizada entre Padua (Italia) y San Fernando (España).

Por su parte, la temperatura superficial del mar (Sea Surface Temperature; SST) del área occidental del Mediterráneo agrupa la señal de temperatura superficial de las aguas mediterráneas comprendidas entre los 5°W-15°E y los 35°N-45°N de la base de datos HadSST2.

Para identificar las variables atmosféricas y marinas con influencia en la evolución de los extremos de temperatura se ha identificado en un primer paso aquéllas que presentan un grado de asociación significativo mediante el coeficiente de correlación no paramétrico Rho de Spearman. Las variables con correlación significativa se han incluido en un modelo de regresión lineal múltiple con entrada sucesiva de dichas variables para identificar cuáles de ellas contribuyen al modelo.

3. Evolución de los extremos de temperatura

La evolución de los índices estacionales de los extremos térmicos basados en percentiles para el litoral mediterráneo se caracteriza por una mayor tendencia en los extremos moderados (Fig. 2), mientras que los índices de percentiles más extremos (Fig. 3) presentan un comportamiento más estable con tendencias menores y poco significativas en algunos casos, característica que se repite para el conjunto de las estaciones del año.

Todos los índices de extremos moderados referidos al número de noches y días fríos (TN) muestran, sin excepción, una

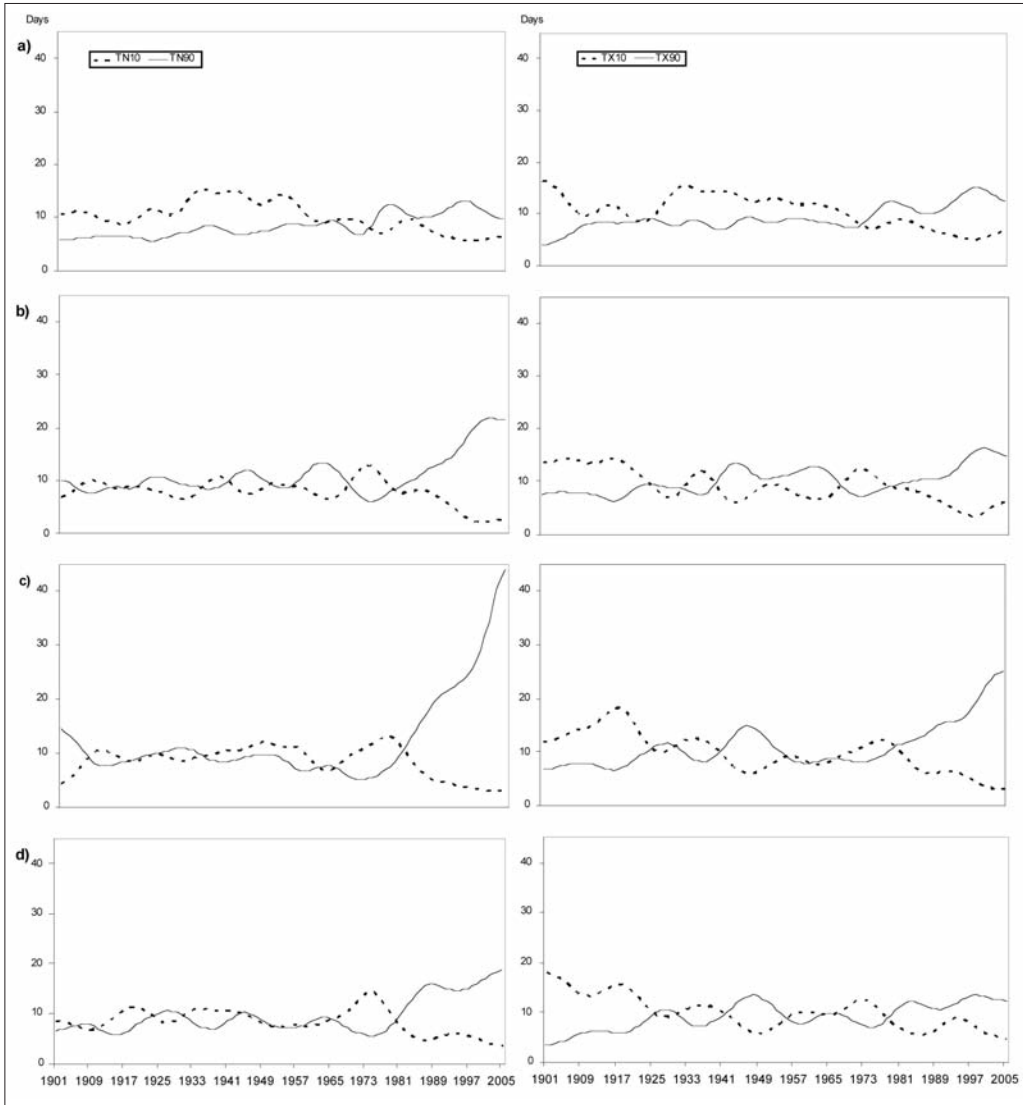


Fig. 2. Series correspondientes a los índices de extremos moderados. Noches frías y cálidas (TN10, TN90) a la izquierda y días fríos y cálidos (TX10, TX90) a la derecha. a) Invierno; b) primavera; c) verano; d) otoño.

evolución de carácter negativo, mientras que el conjunto de índices relativos a las noches y días cálidos (TX) indican un incremento en el número de días por encima de dichos umbrales.

Las tendencias correspondientes al conjunto del periodo 1901-2005 (Cuadro I) corroboran esta evolución, tanto para los índices de extremos moderados como para el resto. Las noches cálidas por encima del

percentil 90 (98) registran las mayores tendencias de carácter positivo, entre 0,76 días/década en verano y 0,37 días/década en invierno (0,20 y 0,11), con valores para la

primavera y el otoño más similares a los estivales, 0,64 y 0,66 días/década respectivamente (0,19 y 0,20).

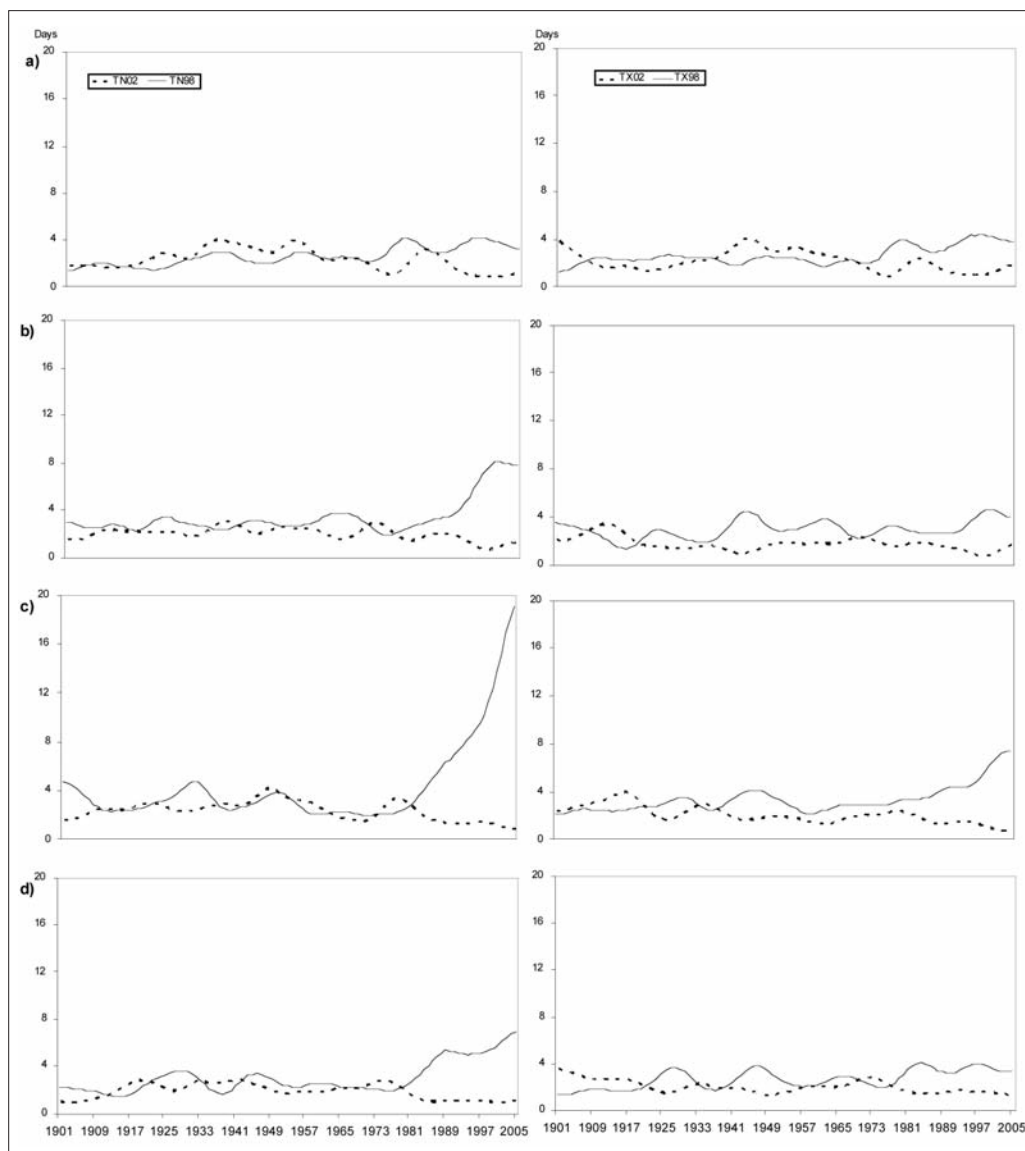


Fig. 3. Series correspondientes a los índices más extremos. Noches frías y cálidas (TN02, TN98) a la izquierda y días fríos y cálidos (TX02, TX98) a la derecha. a) Invierno; b) primavera; c) verano; d) otoño.

Este acentuado incremento en el número de noches cálidas está acompañado de un incremento algo menor, pero también vigoroso, en el número de días cálidos, TX90 (98). En este caso, pero, no hay debilitamiento de la tendencia en invierno, con el mayor incremento igualmente en el verano, 0,69 días/década (0,17), pero muy similar al producido el resto de las estaciones.

Si el mayor incremento corresponde a las noches cálidas de verano, el mayor decremento se localiza en los días fríos de la misma estación, con una disminución de 0,93 días/década. El resto de estaciones presenta tendencias algo menores en el TX10, con valores no superiores a -0,66 días/década. Los días extremadamente fríos, por su parte, se mueven entre una disminución de -0,11 días/década en verano a la no significativa reducción de 0,04 días/década en invierno.

Únicamente el índice relacionado con las noches frías, TN10, no presenta las mayores tendencias durante el verano, sino durante los meses invernales, -0,47 días/década. La disminución de noches extremadamente frías (TN02) se produce, en cambio, durante

la estación estival, -0,09 días/década, siendo ésta la única con tendencia significativa.

Estas tendencias presentan diferencias con las mostradas por Brunet *et al.* (2007b) para el conjunto peninsular, en el que se indicaban mayores reducciones (incrementos) en los días fríos (cálidos) que en las noches, ya que para el litoral mediterráneo los mayores cambios en la evolución de los índices de extremos de temperatura se producen también en la disminución del número de días fríos, pero no con el incremento de días cálidos sino de las noches cálidas.

Tal y como puede observarse en la figura 2, la evolución de los índices no es lineal, sino que se observan periodos con diferente incremento en el valor de los índices de extremos. Con objeto de caracterizar estas diferencias se han analizado las tendencias de las series de índices para los diferentes subperiodos identificados por Brunet *et al.* (2007a) en la evolución de las temperaturas máximas y mínimas españolas y en los índices de extremos para el conjunto español (Brunet *et al.*, 2007b)

Cuadro I. Tendencias decadales (días/década) de las series de extremos de temperatura del litoral mediterráneo para el periodo 1901-2005. En **negrita** la significación es del 0,01 y en *cursiva* la significación es de 0,05.

	Invierno	Primavera	Verano	Otoño
	1901-2005	1901-2005	1901-2005	1901-2005
TN02	-0,02	-0,02	-0,09	0,00
TN10	-0,47	-0,38	-0,30	-0,37
TN90	0,37	0,64	0,76	0,66
TN98	0,11	0,19	0,20	0,20
TX2	-0,04	-0,07	-0,11	<i>-0,05</i>
TX10	-0,66	-0,69	-0,93	-0,79
TX90	0,66	0,51	0,69	0,66
TX98	0,13	0,01	0,17	0,14

Los incrementos decadales de estas tendencias (Cuadro II) muestran para la primera mitad del siglo XX, en concordancia con la evolución del conjunto peninsular, una ausencia de incrementos o decrementos significativos en el número de noches frías y noches cálidas. Los extremos diurnos, en cambio, indican un incremento de los días cálidos (1.73 días/década) y un decremento de los días fríos (-2.06 días/década) que son mayores durante el otoño, aunque también muestran significación durante los meses de verano. Durante el verano únicamente es significativa la disminución de días fríos y extremadamente fríos, mientras que el invierno no arroja tendencias significativas en ninguno de los índices.

El subperiodo siguiente, 1950-1972 se caracteriza por una ausencia de significación en las tendencias, aunque el signo de las pendientes indica una inversión de las tendencias respecto las del conjunto del periodo, más marcada en los índices TX.

Es en el último subperiodo 1973-2005, correspondiente a la fase de incremento térmico más vigoroso observado en las temperaturas españolas (Brunet *et al.*, 2007a y b), cuando se detecta una intensificación en la pendiente de las tendencias. La excepción son los meses invernales, con tendencias similares a las de todo el periodo y sin significación estadística.

Las mayores tendencias en verano, primavera y otoño corresponden al incremento en el número de noches cálidas (extremadamente cálidas), que con incrementos decadales de 10,56 (4,09) días/década, 5,63 (1,74) días/década y 4,29 (1,55) días/década, constituyen los más elevados coeficientes estimados en este análisis. Este aumento se corresponde con una disminución más reciente en el número de noches frías, de entre 2 y 3 días/década.

Los índices correspondientes a días (TX) presentan significación estadística en dos

estaciones, el verano y la primavera, con un aumento en el número de días cálidos que llega a los 4 días/década en verano, mientras que el número de días fríos disminuye en la misma cantidad que las noches frías.

La evolución de los extremos térmicos en el litoral coincide con el comportamiento de la temperatura máxima y mínima diaria en este sector (Brunet *et al.*, 2007a), con menores tasas de cambio hasta inicios de la década de los 70 y un fuerte incremento en la pendiente de las tendencias durante este último subperiodo, mayor que para el resto de la España peninsular.

En conclusión, podemos afirmar que los mayores cambios en la evolución de los índices de extremos de temperatura en el litoral mediterráneo de la PI se producen como consecuencia de la disminución del número de días fríos e incremento de las noches cálidas, aunque en el último subperiodo 1973-2005, para el que se estiman los mayores coeficientes, se produce un incremento de las noches y días cálidos a mayor ritmo de lo que disminuyen los días y noches frías.

4. Relación con los factores de forzamiento

En este apartado se examinan las relaciones entre las series de índices de extremos de temperatura en el litoral mediterráneo y diversos factores de forzamiento atmosférico (NAO y WeMO) y marino (SST del Mediterráneo Occidental).

La principal influencia sobre los extremos de la temperatura corresponde a la SST del Mediterráneo Occidental (Cuadro II). Se observan elevadas y significativas correlaciones entre los índices de extremos térmicos y las SSTs, en todas las estaciones exceptuando al invierno, que no muestra correlaciones significativas ni con las SST ni con los índices atmosféricos.

Todas las correlaciones significativas son de carácter positivo con los índices correspondientes a noches y días cálidos, mientras que tienen carácter negativo con los índices que reflejan la evolución de las noches y días fríos. Estas correlaciones apuntan hacia la existencia de una relación entre el calentamiento de la temperatura superficial del Mediterráneo Occidental y el incremento de extremos cálidos de temperatura, así como con el decremento en los extremos fríos.

La distribución anual de esta influencia está bien diferenciada. Durante la primavera

los coeficientes de correlación entre SST e índices de extremos son del orden de 0,60 para los extremos moderados y algo menores para los índices más extremos. Esta diferencia en el coeficiente de correlación se refleja en el porcentaje de la varianza de los índices de extremos que estas variables explican (Cuadro III). La temperatura superficial del mar durante la primavera explica en torno al 35% de la varianza de los extremos moderados, mientras que en el caso de los índices más extremos este porcentaje se mueve entre el 10% y el 22%.

Las débiles correlaciones detectadas con la

Cuadro II. Tendencias decadales (días/década) de las series de extremos de temperatura del litoral mediterráneo para los diferentes subperiodos de calentamiento/enfriamiento. En **negrita** la significación es del 0,01 y en *cursiva* la significación es de 0,05.

	Invierno					Primavera			
	1901-2005	1901-1949	1950-1972	1973-2005		1901-2005	1901-1949	1950-1972	1973-2005
TN02	-0,09	0,13	<i>-1,06</i>	<i>-0,26</i>	TN02	<i>-0,02</i>	0,04	<i>-0,08</i>	<i>-0,17</i>
TN10	<i>-0,30</i>	0,95	0,42	-2,16	TN10	-0,38	<i>-0,06</i>	<i>-0,11</i>	-2,66
TN90	0,76	<i>-0,27</i>	<i>-2,62</i>	10,56	TN90	0,64	0,50	0,10	5,63
TN98	0,20	0,00	<i>-0,58</i>	4,09	TN98	0,19	0,02	0,24	1,74
TX02	-0,11	<i>-0,25</i>	0,23	<i>-0,12</i>	TX02	-0,07	-0,31	0,23	0,00
TX10	-0,93	-1,69	1,54	-2,31	TX10	-0,69	-1,71	1,36	-2,51
TX90	0,69	1,11	<i>-1,40</i>	4,34	TX90	0,51	0,65	<i>-1,52</i>	2,71
TX98	0,17	<i>0,35</i>	<i>-0,42</i>	1,07	TX98	0,01	0,00	0,36	0,27
	Verano					Otoño			
	1901-2005	1901-1949	1950-1972	1973-2005		1901-2005	1901-1949	1950-1972	1973-2005
TN02	-0,09	0,13	<i>-1,06</i>	<i>-0,26</i>	TN02	0,00	0,16	0,31	<i>-0,50</i>
TN10	<i>-0,30</i>	0,95	0,42	-2,16	TN10	-0,37	0,46	1,38	-2,87
TN90	0,76	<i>-0,27</i>	<i>-2,62</i>	10,56	TN90	0,66	0,61	<i>-0,67</i>	4,29
TN98	0,20	0,00	<i>-0,58</i>	4,09	TN98	0,20	0,25	0,00	1,55
TX02	-0,11	<i>-0,25</i>	0,23	<i>-0,12</i>	TX02	<i>-0,05</i>	<i>-0,22</i>	<i>0,64</i>	0,00
TX10	-0,93	-1,69	1,54	-2,31	TX10	-0,79	-2,06	2,50	<i>-0,99</i>
TX90	0,69	1,11	<i>-1,40</i>	4,34	TX90P	0,66	1,73	<i>-0,87</i>	<i>2,31</i>
TX98	0,17	<i>0,35</i>	<i>-0,42</i>	1,07	TX98p	0,14	<i>0,18</i>	0,37	0,29

Cuadro III. Coeficientes de correlación de Spearman significativos al 99% entre las series estacionales de extremos de temperatura y los índices estacionales correspondientes a la WeMO, NAO y SST. El número del acrónimo (13, 14, 15, 16) corresponde respectivamente a invierno, primavera, verano y otoño. El invierno no se incluye porque no presenta correlaciones significativas con ninguno de los índices seleccionados. Índices con (*) indican que corresponde a la estación del año anterior.

	WEMO13	WEMO14	WEMO15*	WEMO16*	NAO13	NAO14	NAO15*	NAO16*	SST_13	SST_14	SST_15*	SST_16*
TN02N14										-0,37		
TN05N14										-0,52		
TN10N14										-0,59		
TN90N14										0,64		
TN95N14									0,25	0,62		
TN98N14										0,54		
TX02N14										-0,34		
TX05N14										-0,50		
TX10N14						-0,27			-0,26	-0,60		
TX90N14						0,25				0,61		
TX95N14										0,56		
TX98N14										0,39		
	WEMO13	WEMO14	WEMO15	WEMO16*	NAO13	NAO14	NAO15	NAO16*	SST_13	SST_14	SST_15	SST_16*
TN02N15			0,40									-0,31
TN05N15			0,27							-0,26		-0,57
TN10N15			0,28							-0,34		-0,66
TN90N15										0,32		0,62
TN95N15										0,29		0,58
TN98N15										0,26		0,53
TX02N15		0,28	0,38						-0,33	-0,40		-0,53
TX05N15		0,34	0,45						-0,33	-0,48		-0,71
TX10N15		0,36	0,49						-0,38	-0,50		-0,74
TX90N15		-0,37	-0,26						0,30	0,39		0,51
TX95N15		-0,31							0,35	0,33		0,40
TX98N15		-0,31							0,26	0,28		0,34
	WEMO13	WEMO14	WEMO15	WEMO16	NAO13	NAO14	NAO15	NAO16	SST_13	SST_14	SST_15	SST_16
TN02N16												
TN05N16										-0,31		-0,34
TN10N16				0,29						-0,35		-0,48
TN90N16			-0,29						0,28	0,34	0,40	0,54
TN95N16									0,29	0,35	0,41	0,50
TN98N16			-0,29		0,27				0,28	0,37	0,35	0,45
TX02N16			0,25									-0,35
TX05N16			0,31				0,25			-0,33	-0,26	-0,51
TX10N16			0,32							-0,36		-0,59
TX90N16			-0,31						0,30	0,36		0,45
TX95N16			-0,31						0,29	0,30		0,36
TX98N16										0,26		0,28

NAO sólo tienen una contribución significativa para los días fríos de primavera, en los que junto con la SST permiten explicar el 35,8% de la variabilidad de estos extremos.

El verano es la estación del año con mayores coeficientes de correlación, tanto con la SST como con patrones atmosféricos. Los extremos moderados de la temperatura muestran correlaciones elevadas con la SST estival, superiores a 0,50 en todos los casos, y llegando a -0,74 para el número de días fríos. Los índices más extremos tienen coeficientes algo menores, moviéndose entre 0,30 y 0,53. Por su parte, se estiman también correlaciones significativas con el índice de la WeMO estival, con coeficientes que llegan hasta 0,49 con los extremos de días fríos.

Es interesante observar que, contrariamente a la primavera, durante el verano las condiciones térmicas del Mediterráneo Occidental y de la circulación atmosférica de la estación anterior, e incluso dos estaciones anteriores en el caso de la SST, presentan relación con los índices de extremos de temperatura.

Al examinar los porcentajes de varianza explicados por las regresiones se advierte una clara diferencia entre los factores que afectan a los índices nocturnos y a los diurnos. Aunque en ambos está presente la SST del verano, en los primeros es la única variable significativa, que explica hasta el 35% de la varianza de las noches frías, mientras que en los índices TX, se incorpora la influencia de las SST de invierno en el caso de los extremos fríos y de la WeMO de primavera en los días cálidos. Esta conjunción de factores atmosféricos y marinos permite explicar el valor relativo de 51,4% para el índice de número de días fríos durante el verano.

En los meses de otoño es cuando se detecta un mayor número de influencias sobre la evolución de los índices de extremos. Aparte de la SST de otoño, también influyen las SST del resto de estaciones del año, con correlaciones

menores cuanto más retardo hay entre las señales, y algunos índices atmosféricos como la NAO de invierno y la WeMO de otoño.

Esta diversidad de señales significativas permite que los modelos de regresión expliquen, en el caso de los índices de extremos moderados, porcentajes superiores al 40%, excepción hecha de los días fríos, con un porcentaje inferior. También la viabilidad de las noches extremadamente cálidas está explicada en un 35% por las SST otoñales e invernales y la NAO de invierno.

Estos resultados indican una clara influencia de la SST del Mediterráneo Occidental sobre los extremos térmicos en el litoral mediterráneo de la PI, que permite explicar de forma mucho más robusta las señales de los índices de extremos que los índices atmosféricos empleados. No hay que descartar pero, tal y como señala Prieto et al. (2002), que la influencia de la NAO sobre los extremos sea de carácter no lineal u obedezca a las características del índice utilizado (Castro et al., 2002).

5. Conclusiones

Durante el periodo 1901-2005 los extremos térmicos en el Mediterráneo Occidental muestran una significativa disminución en el número de días y noches fríos, mientras que el conjunto de índices relativos a las noches y días cálidos indican un incremento en el número de días por encima de los umbrales definidos.

La mayor contribución al calentamiento en el litoral mediterráneo se produce por la disminución del número de días fríos y el incremento en el número de noches cálidas. Las mayores tasas de cambio se estiman para los meses de verano, mientras que durante el invierno se producen en general menores tendencias, exceptuando la

Cuadro IV. Porcentaje de varianza explicada de las series de índices de temperatura calcula por regresión lineal múltiple de las variables con contribución significativa. El número del acrónimo (13, 14, 15, 16) corresponde respectivamente a invierno, primavera, verano y otoño. Índices con (*) indican que corresponde a la estación del año anterior.

Índices	Variables significativas	% varianza explicada	Índices	Variables significativas	% varianza explicada
TN0214	SST_14	16,8	TX0214	SST_14	10,0
TN1014	SST_14	27,8	TX1014	SST_14, NAO14	35,8
TN9014	SST_14	36,2	TX9014	SST_14	34,6
TN9814	SST_14	22,2	TX9814	SST_14	15,4
TN0215	SST_15	7,1	TX0215	SST_15, SST_13	24,0
TN1015	SST_15	35,5	TX1015	SST_15, SST_13	51,4
TN9015	SST_15	26,9	TX9015	SST_15, WEMO14	27,2
TN9815	SST_15	15,1	TX9815	SST_15	10,8
TN0216		0	TX0216	SST_16	16,3
TN1016	SST_16, SST_14	21,4	TX1016	SST_16, SST_14	45,4
TN9016	SST_16, NAO13, SST_13, SST_15	41,2	TX9016	SST_16, WEMO16, SST_14	41,8
TN9816	SST_16, NAO13, SST_13	35,1	TX9816	SST_16	7,6

disminución de las noches frías, que tiene su máximo precisamente durante la estación invernal.

Estos cambios en los valores extremos se agudizan durante el último subperiodo analizado, 1973-2005, que coincide con el vigoroso y sostenido calentamiento experimentado en la España peninsular durante esas décadas. Así, de primavera a otoño se detectan ratios de incremento/decremento mucho mayores a las calculadas para el resto de subperiodos, con el máximo incremento en los 10,56 días/década en el número de noches cálidas.

El principal factor de forzamiento asociado a los cambios en los extremos de temperatura es la temperatura superficial del Mediterráneo Occidental, tanto de la estación en que se produce el extremo como de las estaciones anteriores. Dichas

temperaturas permiten explicar porcentajes de la variabilidad de las series de extremos que llegan a superar el 50% durante la estación estival, cuando más fuerte es la relación entre la señal marina y los extremos térmicos.

Bibliografía

BARNSTON, A. G. y LIVEZEY, R. E. (1987): «Classification, Seasonality and Persistence of Low-Frequency Atmospheric Circulation Patterns». *Monthly Weather Review* nº 115, pp. 1083-1126.

BRUNET, M., SALADIÉ, O., JONES, P. D., SIGRÓ, J., MÖBERG, A., AGUILAR, E., WALTHER, A., LISTER, D., LÓPEZ, D. y ALMARZA, C. (2006): «The development of a new daily adjusted temperature

dataset for Spain (1850-2003)». *International Journal of Climatology*, nº 26, pp. 1777-1802.

BRUNET, M., JONES, P. D., SIGRÓ, J., SALADIÉ, O., AGUILAR, E., MOBERG, A., DELLA-MARTA, P. M., LISTER, D., WALTHER, A. y LOPEZ, D. (2007a): «Temporal and spatial temperature variability and change over Spain during 1850-2005». *Journal of Geophysical Research-Atmospheres* nº 112, D12117, doi:10.1029/2006JD008249.

BRUNET, M., JONES, P. D., SIGRÓ, J., SALADIÉ, O., AGUILAR, E., MOBERG, A., LISTER, D. y WALTHER, A. (2007b): «Long-term extreme temperature and precipitation change over Spain». *Contributions to Science* nº 3 (3), pp. 333-344, DOI: 10.2436/20.7010.01.1 ISSN: 1575-6343

BRUNET, M., SALADIÉ O., JONES, P. D., SIGRÓ, J., AGUILAR, E., MOBERG, A., LISTER, D., WALTHER, A. y ALMARZA, C. (2008): *A case-study/guidance on the development of long-term daily adjusted temperature datasets*. WMO-TD-1425/WCDMP-66, Geneva: 43 pp.

CASTRO-DÍEZ, D., POZO-VÁZQUEZ, F., RODRIGO S. y ESTEBAN-PARRA, M. J. (2002): «NAO and winter temperature variability in southern Europe». *Geophysical Research Letters* nº 29, doi. 10.1029/2001GL014042, 2002

DELLA-MARTA P. M., LUTERBACHER, J., VON WEISSENFLOH, H., XOPLAKI, E., BRUNET, M. y WANNER, H. (2007a): Summer heat waves over western Europe 1880-2003, their relationship to large scale forcings and predictability. *Climate Dynamics* 29, pp. 251-275, doi: 10.1007/s00382-007-0233-1.

DELLA-MARTA, P. M., HAYLOCK, M. R., LUTERBACHER, J. y WANNER, H. (2007b): «Doubled length of western European summer heat waves since 1880».

Journal of Geophysical Research nº 112, D15103, doi:10.1029/2007JD008510.

GARCÍA-HERRERA, R., PRIETO, L., DÍAZ, J., HERNÁNDEZ, E. y DEL TESO, M. T. (2002): «Synoptic conditions leading to Extremely Hot temperatures in Madrid». *Annales Geophysicae* nº 20, pp. 237-245.

GARCÍA-HERRERA, R., DÍAZ, J., TRIGO, R. M. y HERNANDEZ, E. (2005): «Extreme summer temperatures in Iberia: health impacts and associated synoptic conditions». *Annales Geophysicae* nº 23, pp. 239-251.

HURRELL, J. W. (1995): «Decadal trends in the North Atlantic Oscillation and relationships to regional temperature and precipitation». *Science* nº 269, pp. 676-679.

JONES, P. D. y HULME, M. (1996): «Calculating regional climatic time series for temperature and precipitation: methods and illustrations». *International Journal of Climatology* nº 16, pp. 361-377.

JONES, P. D., JÓNSSON, T. y WHEELER, D. (1997): «Extension to the North Atlantic Oscillation using early instrumental pressure observations from Gibraltar and South-West Iceland». *International Journal of Climatology* nº 17, pp. 1433-1450.

KLEIN TANK, A., WIJNGAARD, J. y VAN ENGELEN, A. (2002): «Climate of Europe. Assessment of observed daily temperature and precipitation extremes». *European Climate Assessment & Dataset project ECA&D, KNMI, DeBilt, Netherlands*.

MARTIN-VIDE, J. y LOPEZ-BUSTINS, J.A. (2006): «The Western Mediterranean Oscillation and Rainfall in the Iberian Península». *International Journal of Climatology* nº 26 (11), pp. 1455-1475.

MIRÓ J. J., ESTRELA, M. J. y MILLÁN, M. (2006): «Summer temperature trends in a Mediterranean area (Valencia región)». *International Journal of Climatology* nº 26, pp.1051-1073.

- MOBERG, A., JONES, P. D.; LISTER, D., WALTHER, A., BRUNET, M., JACOBET, J., ALEXANDER, L. V., DELLA-MARTA, P. M., LUTERBACHER, J., YIOU, P., CHEN, D. L., TANK A. M. G. K., SALADIE, O., SIGRO, J., AGUILAR, E. *et al.*, (2006): «Indices for daily temperature and precipitation extremes in Europe analysed for the period 1901-2000». *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 111, (D22): Art. No. D22106.
- PEREIRA, P., MORAIS, L. y UBEDA, X. (2008): «Comportamiento de las temperaturas extremas en la segunda mitad del XX en Lisboa». En Sigró et al. *Cambio Climático Regional y sus Impactos*. Publicaciones de la AEC, Serie A – 6, pp. 413-424.
- PRIETO, L., GARCÍA-HERRERA, R., DÍAZ, J., HERNÁNDEZ, E. y DEL TESO, M. T. (2002): «NAO influence on extreme winter temperatures in Madrid». *Annales Geophysicae* n° 20, pp. 2077-2085.
- PRIETO, L., GARCÍA-HERRERA, R., DÍAZ, J., HERNÁNDEZ, E. y DEL TESO, M. T. (2004): «Minimum Extreme Temperaturas over Peninsular Spain». *Global and Planetary Change* n° 4, pp. 59-71.
- RAYNER, N. A., BROHAN, P., PARKER, D. E., FOLLAND, C. K., KENNEDY, J. J., VANICEK, M., ANSELL, T. y TET, S. F. B. (2006): «Improved analyses of changes and uncertainties in marine temperature measured in situ since the mid-nineteenth century: the HadSST2 dataset». *Journal of Climate* n° 19, pp. 446-469.
- RODRÍGUEZ-PUEBLA, C., FRÍAS, M. D. y ENCINAS, A. H. (2004): «Relaciones entre los extremos de temperatura máxima y patrones de circulación en el Atlántico Norte». *XXVIII Jornadas Científicas. La Meteorología y clima Atlánticos. 5º Encuentro Hispano-Luso de Meteorología, Badajoz*, Spain, 11-13 February, p. 6. Pub. de la Asociación Española de Meteorología, Badajoz.
- SEN, P. K. (1968): «Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau». *Journal of the American Statistical Association* n° 63, pp. 1379-1389.
- SIGRÓ, J., BRUNET, M., AGUILAR, E. y SALADIÉ, O. (2008): «Variaciones temporales en los índices de extremos térmicos en el patrón SEES (South-Eastern and Eastern Spain) de la red SDATS (Spanish Daily Adjusted Temperature Series)». En Estrela, M. J. *Riesgos Climáticos y Cambio Global en el Mediterráneo español ¿Hacia un Clima de Extremos?*, UNED, Col. Interciencias 34, pp. 77-96.
- WALTHER, A. (2004): *EMULATE Extremes Indices Software*, <http://www.cru.uea.ac.uk/projects/emulate/public/>
- ZHANG, X., HEGERL, G., ZWIERS, F. W. y KENYON, J. (2004): «Avoiding inhomogeneity in percentile-based indices of temperature extremes». *Journal of Climate*, 18, pp. 1641-1651.
- ZHANG, X.; VINCENT, L. A., HOGG, W. D. y NIITSOO, A. (2000): «Temperature and precipitation trends in Canada during the 20th Century». *Atmosphere and Ocean*, 38, pp. 395-429.