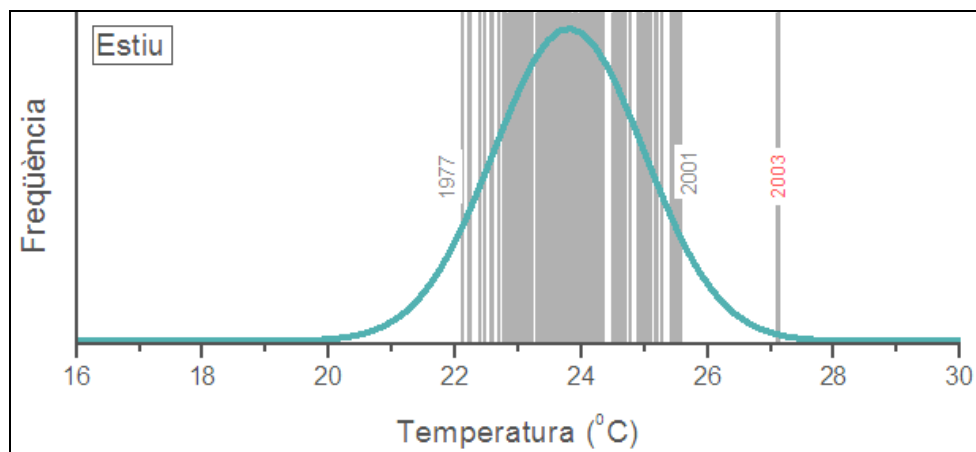


VALORACIÓ DE L'ONADA DE CALOR DE L'ESTIU DE 2003 A LA FAÇANA MEDITERRÀNIA DE LA PENÍNSULA



Mercè Castellà Sánchez

**VALORACIÓ DE L'ONADA DE CALOR DE L'ESTIU DE
2003 A LA FAÇANA MEDITERRÀNIA DE LA
PENÍNSULA**

**per
Mercè Castellà Sánchez**

**Màster de Meteorologia
Facultat de Física
Universitat de Barcelona**

Setembre de 2010

**Tutora:
Dra. Manola Brunet India**

Universitat Rovira i Virgili



Universitat de Barcelona



Índex

1	Introducció	6
2	Dades i metodologia	8
3	Discussió i resultats	12
3.1	L'onada de calor de 2003 a la costa mediterrània de la Península Ibèrica	12
3.2	Posant en context temporal l'onada de calor de 2003	16
3.3	Evolució dels extrems càlids a partir d'indicadors climàtics	23
4	Conclusions	31
5	Referències	33

Resum

L'onada de calor que va afectar gran part d'Europa durant l'estiu de 2003 va tenir també un fort impacte sobre la costa Mediterrània de la península Ibèrica (PI). L'objectiu d'aquest estudi és posar en context instrumental i esbrinar el caràcter excepcional o no de l'episodi de calor ocorregut entre juny i agost de 2003 mitjançant l'anàlisi estadística de sèries de temperatures màximes (Tx) i mínimes (Tn) ajustades a l'escala diària, les quals pertanyen a 5 estacions distribuïdes al llarg de la costa mediterrània de la península, de nord a sud: Barcelona, València, Alacant, Múrcia i Màlaga.

S'han analitzat les característiques estadístiques tant de valors extrems com mitjans de temperatura de l'estiu de 2003 i s'han comparat amb els valors corresponents del període 1900-2007. Sobre la base de l'estudi, l'episodi de 2003 és considerat extrem i inusual, amb una temperatura mitjana (Tm) de les 5 estacions per a Juny-Juliol-Agost (JJA) que excedeix 3.3°C la mitjana 1900-2007, 1.6 °C més que l'episodi més proper amb l'anomalia més gran, al 2001. Cal destacar que l'episodi fou més acusat al nord que al sud.

Tots els observatoris presenten tendències positives significatives en l'augment de Tn per sobre els percentils 90è, 95è i 98è i en menys casos per les Tx per sobre d'aquests percentils

Abstract

The 2003 summer heat wave that affected most of Europe also had a high impact on the Mediterranean coast of the Iberian Peninsula (IP). The aim of this study, therefore, is to statically put this event in the context of the instrumental period and find out whether it was an exceptional extreme occurrence or not. The hot event that took place between June and August of 2003 is examined through statistical analysis of daily adjusted maximum (Tx) and minimum (Tn) temperatures series belonging to 5 stations distributed along the Mediterranean coast of the IP: namely from North to South Barcelona, València, Alacant, Múrcia and Màlaga.

Statistical analysis have been carried out of both extreme and mean temperature values in the summer of 2003, putting them in the context of the 1900-2007 period. The 2003 event is considered extreme and unusual. Averaged summer (June to August) temperature for the 5 stations exceeds by 3.3 °C the 1900-2007 mean, with a larger anomaly (1.6 °C) than the second higher occurrence in 2001. The episode was more pronounced in the north than in the south of the IP.

All Tn records show significant positive trends for values exceeding the 90th, 95th and 98th percentiles, while for Tx upper percentiles increasing trends are less general.

1 Introducció

Els episodis de temperatura extrema són cada cop més estudiats, ja que en les últimes dècades s'ha detectat un augment d'aquests fenòmens (Alexander et al., 2006). A Europa la tendència positiva a un augment de la Tx ha estat més destacada en els últims 50 anys (Klein Tank et al., 2005; Della-Marta et al., 2007) i ha hagut un augment en la freqüència de dies càlids i un augment en la persistència d'onades de calor (Della Marta et al., 2007).

L'onada de calor que va afectar gran part d'Europa el 2003 va causar a Espanya al voltant de 6.500 morts, segons conclou l'estudi "Valoración del impacto de la ola de calor del verano de 2003 sobre la mortalidad", publicat a l'informe 2004 de la Societat Espanyola de Salud Pública y Administración Sanitaria (SESPAS), així com pèrdues econòmiques i nombrosos incendis.

Estudis fets sobre el canvi climàtic suggereixen que les onades de calor europees seran més freqüents i severes durant aquesta centúria. (Schär, C. et al. 2004; Meehl et al., 2004) i segons l'estudi fet per E.M. Fischer and C. Schär 2010, en termes d'impactes cap a la salut, les projeccions són molt més severes per a latituds baixes al sud d'Europa i per la costa mediterrània on la freqüència d'onades amb condicions perilloses creix significativament més ràpid i aquestes són més freqüents.

Per aquest motiu crec que és interessant l'estudi estadístic de l'onada de calor de l'estiu de 2003 a la façana mediterrània, des de la costa catalana fins a la costa del Sol. Hi ha nombrosos estudis fets sobre l'onada de calor europea de l'estiu de 2003 però cap d'aquesta zona de la PI i m'ha semblat important poder valorar estadísticament si l'estiu de 2003 va ser excepcional i extrem en el context del període a estudiar (1900-2007), al cop que poder caracteritzar-lo.

Citem alguns dels treballs fets fins ara, per exemple, Della Marta et al. (2007) han analitzat 54 sèries de temperatures màximes de l'Europa occidental conclouent que la longitud de les onades de calor s'ha duplicat i la freqüència dels dies càlids quasi s'ha triplicat en el període 1800-2005.

Schär et al. (2004) han estudiat 4 sèries fiables de Suïssa representatives del nord-oest de la falda dels Alps i han mostrat que la temperatura mitja promig de les 4 estacions dels mesos de juny i agost de 2003 es troba lluny de la distribució estadística, i també en el conjunt de l'estiu. Per a l'estiu, en aquest indret, l'anomalia tèrmica va ser de 5.1 °C respecte a la mitja del període 1864-2000, que correspon a 5.4 desviacions estàndards.

A Espanya, Brunet et al. (2007) han analitzat el canvi que s'ha produït en el comportament anual dels extrems climàtics a la PI des de 1901 fins al 2005 i entre d'altres resultats han conclòs que durant el període recent de fort escalfament (des de 1973) l'escalfament de les cues de Tn s'ha accelerat. Les onades de calor (fred) han augmentat (disminuït) al llarg del segle XX, però durant el període recent d'escalfament les onades de calor han augmentat en durada a un ritme més alt que les onades de fred.

Aburrea et al. (2007) han analitzat el canvi observat en la temperatura màxima diària de l'estiu durant el període 1951-2004, al centre de la conca del riu Ebre i han obtingut que l'escalfament observat des de 1975 no es homogeni en tot el període d'estiu, particularment a partir de l'any 1990. L'estiu és ara més calent de manera més uniforme que 30 anys abans i el període propens a l'ocurrència d'esdeveniments extremadament càlids és major.

En aquest estudi es pretén posar en el context dels darrers 107 anys, l'estiu de 2003 i veure si el seu caràcter fou inusual, com una aproximació a la "detecció" estadística de la excepcionalitat d'aquest estiu mitjançant l'anàlisi estadístic de sèries de temperatures ajustades a escala diària de 5 estacions distribuïdes al llarg de la costa mediterrània de la península.

Hem analitzat per les temperatures màximes i mínimes a la costa mediterrània els índex basats en percentils i l'índex WSDI (warm speel duration index) per veure si durant l'estiu de 2003 es va produir un major nombre d'extrems d'aquest tipus respecte d'altres estius.

A fi d'arribar als objectius citats he estructurat el treball amb una introducció al tema d'estudi, dades i mètodes emprats, resultats i discussió i conclusions.

2 Dades i metodologia

Per tal de dur a terme un bon estudi climàtic és primordial disposar de sèries d'alta qualitat i homogènies a llarg termini. En aquest estudi s'han utilitzat cinc sèries que formen part de la base de dades "Spanish Daily Adjusted Temperature Series" (SDATS) Brunet et al. (2006; 2008). La SDATS està composta per les 22 sèries més llargues, continuades i més fiables de temperatura diària enregistrades a Espanya des de mitjans del segle XIX fins a principis del segle XXI. Aquesta base de dades va ser creada sota el projecte europeu anomenat EMULATE (European and North Atlantic daily to MULTidecadal climATE variability, www.cru.uea.ac.uk/cru/projects/emulate/), amb l'objectiu de relacionar les variacions i tendències en els patrons de circulació atmosfèrica a temperatures i precipitació considerablement extremes per al període 1850-2003.

Aquestes sèries han sigut acuradament tractades amb un estricte control de qualitat, correcció de les desviacions per efecte del tipus de pantalla protectora dels termòmetres i ajust a l'escala diària per minimitzar les ruptures d'homogeneïtat causades per un variat conjunt de factors (Brunet et al. 2006, 2008).

Per elaborar el present estudi s'han escollit 5 de les 22 estacions que formen les SDATS, localitzades regularment sobre la costa mediterrània espanyola, les quals queden representades en la figura 1 i en la taula I. El període d'anàlisi triat és 1900-2007, per la qual cosa s'han actualitzat aquestes sèries amb dades diàries pel 2006 i 2007 obtingudes de la Agencia Estatal de Meteorologia (AEMet). I les variables analitzades han estat la temperatura màxima i mínima diària de les estacions esmentades.



Figura 1 Mapa de localització de les 5 estacions de la façana mediterrània de les SDATS

Taula I. Posició geogràfica, altura i període de la sèrie de les 5 estacions utilitzades.

Localització	Longitud	Latitud	Altura (m)	Període
Barcelona	02° 10' 36''W	41° 25' 05''N	420.1	1900-2007
València	00° 22' 52''E	39° 28' 48''N	11.4	1900-2007
Alacant	00° 29' 40''W	38° 22' 00''N	81.5	1900-2007
Múrcia	01° 07' 14''W	37° 58' 59''N	57.0	1900-2007
Màlaga	04° 28' 57''W	36° 39' 57''N	6.5	1900-2007

Inicialment hem representat l'evolució diària de la Tx i Tn de l'estiu de 2003 per a cada observatori, junt amb els llinars percentil 90è, percentil 95è i percentil 98è de cada mes per tal de poder identificar les successives onades de calor i ratxes de nits càlides que hi va haver i fer una valoració intraestacional i també entre observatoris. A més, per a cada variable mostrem en la mateixa figura l'evolució de la temperatura diària promig de tot el període (1900-2007), d'aquesta manera podem veure com ha sigut el comportament de l'estiu en estudi respecte el promig del conjunt.

Per altra banda, per tal de veure si les temperatures de l'estiu de 2003 a la costa mediterrània espanyola són molt superiors a les normals i poder caracteritzar l'episodi, hem representat el gràfic d'anomalies de Tx i Tn, promig simple de les 5 estacions, respecte les Tm del període 1961-90. I a continuació, per posar en

context el caràcter excepcional o no dels episodis de calor observats hem estimat les anomalies estandarditzades estivals de les temperatures màximes i mínimes diàries respecte del període 1900-2007, seguint l'aproximació de Jones i Hulme (1996), pel conjunt de la costa mediterrània Ibèrica. També hem analitzat quina és la posició d'aquest estiu respecte del període analitzat (1900-2007) mitjançant l'anàlisi de la distribució gaussiana caracteritzada per la mitjana i la desviació estàndard del període d'estudi de la temperatura mitjana diària amitjanada mensualment, juny, juliol i agost i estacionalment per a l'estiu.

Per a cada una de les estacions disposades al llarg de la costa mirem si l'anomalia tèrmica és igual o hi ha diferències geogràfiques i estimem les anomalies estandarditzades estivals de les temperatures mitjanes, màximes i mínimes diàries respecte del període 1900-2007.

Seguidament, per establir la significació calculem mitjançant el test de Wilcoxon (Szinell et al., 1998 ; Domonkos et al. 2003) la significança de l'augment en la freqüència de Tx i Tn per sobre del percentil 90è, 95è i 98è en el conjunt del període analitzat.

La metodologia del test és la següent:

suposem que els esdeveniments per sobre del llindar són $r_i (i = 1, \dots, m)$, en aquests casos definim $\varepsilon(r_i) = 1$

Sigui r el rang de l'estadística definit com:

$$r = \sum_{i=1}^m r_i = \sum_{i=1}^n t \varepsilon(t)$$

on :

n és el nombre de dies que examinem

t és el temps transcorregut des del principi de la sèrie.

Sota la hipòtesis nul·la (H_0):

l'esperança condicional i la variància són les següents:

$$E(r|m) = \frac{m(n+1)}{2}$$

$$V(r|m) = \frac{m(n-m)(n-1)}{12}$$

i el test estadístic aplicat és:

$$\frac{r - E(r|m)}{\sqrt{V(r|m)}}$$

amb una distribució normal estandarditzada.

El resultat d'aquest test, a diferència d'altres tests, no deriva d'una distribució gaussiana, és a dir, per a aplicar aquest test la distribució pot no ser gaussiana, com és el cas d'estudi ja que es tracta d'esdeveniments puntuals.

Finalment mitjançant el paquet de programari per al càlcul d'índexs (RClimDex) que es basa en el paquet estadístic R de lliure accés, <http://cccma.seos.uvic.ca/ETCCDMI/software.shtml>, calculem els índex climàtics (CLIVAR INDEX); Tx90p, Tn90p i WSDI. Els acrònims Tx90p i Tn90p signifiquen el percentatge de dies amb la Tx i Tn respectivament per sobre del percentil 90è. Per altra banda WSDI és l'acrònim en anglès de índex de duració de ratxes càlides (Warm Speel Duration Index), i representa el nombre anual de dies amb almenys 6 dies consecutius amb la Tx per sobre del percentil 90è.

Mentre els primers tenen una resolució mensual, l'índex WSDI dona un valor anual, això no ens permetia identificar temporalment l'onada de calor a l'estiu. Per aquest motiu, hem fet un programa que calcula l'índex exclusivament pels estius. A més, també hem adaptat el WSDI per poder analitzar les temperatures mínimes diàries i poder amb això estudiar la duració de ratxes de nits càlides, entenent-les com el nombre de dies en que almenys 6 nits consecutives registren valors superiors al percentil 90è.

3 Discussió i resultats

3.1 L'onada de calor de 2003 a la costa mediterrània de la península Ibèrica

Introduïm l'episodi de l'estiu de 2003 descrivint l'evolució de la temperatura màxima i mínima diària durant els mesos de juny, juliol i agost d'aquest any a cada una de les estacions considerades, tal com mostren les figures 2.1-2.10.

A Barcelona s'inicia una onada de calor intensa a principis de juny i es prolonga fins a finals de mes. Entre juny i juliol hi ha una petita treva si bé al juliol hi ha un altre episodi i a la primera quinzena d'agost es dona l'episodi més fort i continuat.

Pel que fa a les ratxes de nits càlides, igual que per a les temperatures màximes hi va haver un episodi molt important al juny amb temperatures mínimes molt per sobre del percentil 98è i una petita treva entre juny i juliol. També les nits del mes de juliol van ser un poc menys càlides però altes, i novament a la primera quinzena d'agost té lloc una ratxa molt intensa i persistent amb màximes molt per sobre del percentil 98è.

A València durant la segona setmana de juny comença l'onada de calor molt forta i persistent que dura fins a principis de juliol, destacant dies amb la màxima molt per sobre del percentil 98è. Al juliol hi ha dies amb la temperatura màxima per sobre el percentil 90è però no s'observa cap onada. Finalment a la primera quinzena d'agost es dona un episodi d'onada de calor intensa. Cal dir que igual que a Barcelona en els tres mesos s'observen dies amb les màximes superiors al percentil 98è.

Respecte a les mínimes, la primera ratxa de nits càlides comença a la segona quinzena de juny amb un continuo de nits molt càlides fins a finals de juny. A diferència de Barcelona, es dona un episodi intens i persistent a finals de juliol. En el mes d'agost les temperatures mínimes superen moltes nits el percentil 90è però intermitentment, alternant nits molt càlides amb d'altres de menys.

A Alacant en aquest estiu les onades són més modestes que al nord. Igual que a Barcelona i València la primera onada s'inicia al voltant de la primera quinzena de juny i els dos episodis més forts i persistents són al juliol i a la primera quinzena d'agost. No obstant el percentil 98è només es supera al juliol.

El comportament de la temperatura mínima és molt semblant a València, amb dos episodis, un al juny amb nits per sobre del percentil 98è i l'altre episodi intens i persistent, també amb $T_n > \text{Percentil } 98è$ en la segona quinzena de juliol. Notem que a finals d'agost hi ha nits amb les mínimes per sobre del percentil 98è.

També en les mateixes dates comença l'episodi de calor a Múrcia, però tot i que durant l'estiu hi ha dies amb les màximes per sobre el percentil 90è, principalment al juny i segona quinzena de juliol, no hi ha persistència. En aquest observatori a l'agost de 2003 hi ha pocs dies amb la $T_x > \text{percentil } 98è$, ja que les temperatures màximes d'aquest mes són elevades i el percentil 98è ronda els 40°C.

Per altra banda, l'evolució de les temperatures mínimes és pràcticament igual que a Alacant si bé en el mes d'agost només hi ha un dia que la mínima supera lleugerament el percentil 98è.

A Màlaga l'evolució de les temperatures màximes de l'estiu és molt semblant a Múrcia amb màximes elevades al juny i finals de juliol, sobretot amb dies molt càlids en la segona quinzena de juliol. L'agost és més modest i les temperatures més altes són cap a final de mes.

S'observa una ratxa de nits càlides poc persistent però intensa a finals de juny. El juliol tret del principi i el final, és més suau. I a l'agost hi ha nits càlides però alternades amb d'altres de no tant.

Per acabar comparem les temperatures de l'estiu de 2003 amb el promig de tot el període per veure com ha estat l'estiu de 2003 respecte el promig del conjunt (veure figures 2.1-2.10). Totes les estacions presenten una separació considerable entre la temperatura màxima diària d'aquest estiu amb la temperatura màxima promig. A València és on s'observa una diferència més gran. Cal destacar però que a mesura que baixem cap al sud la diferència és menor, i a Múrcia i sobretot a Màlaga les

temperatures s'aproximen més a les amitanades que la resta, on inclòs hi ha dies amb la temperatura màxima i la mínima per sota del promig del període.

Igual que les temperatures màximes, les mínimes de l'estiu de 2003 són considerablement més altes, a tota la costa, que les mínimes amitanades per a tot el període, si bé a Màlaga la diferència és menor.

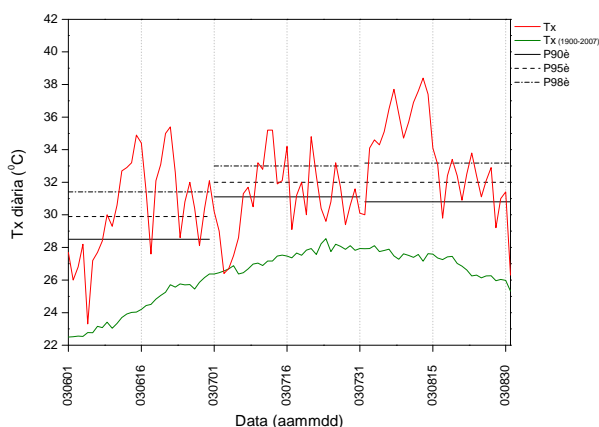


Figura 2.1 Evolució diària de Tx de l'estiu de 2003 amb els percentils 90è, 95è i 98è i evolució de Tx promig del període 1900-2007 a Barcelona

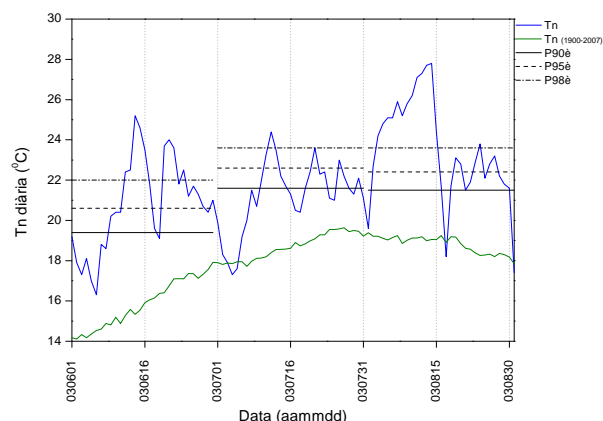


Figura 2.2 Evolució diària de Tn de l'estiu de 2003 amb els percentils 90è, 95è i 98è i evolució de Tn promig del període 1900-2007 a Barcelona

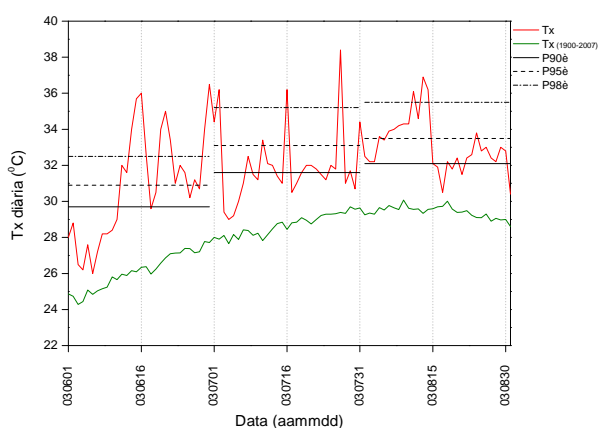


Figura 2.3 Evolució diària de Tx de l'estiu de 2003 amb els percentils 90è, 95è i 98è i evolució de Tx promig del període 1900-2007 a València.

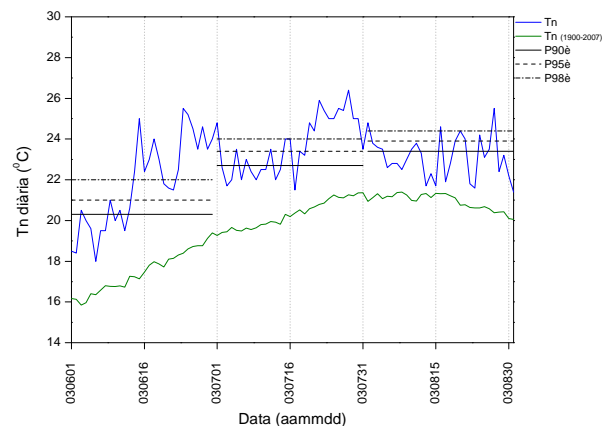


Figura 2.4 Evolució diària de Tn de l'estiu de 2003 amb els percentils 90è, 95è i 98è i evolució de Tn promig del període 1900-2007 a València.

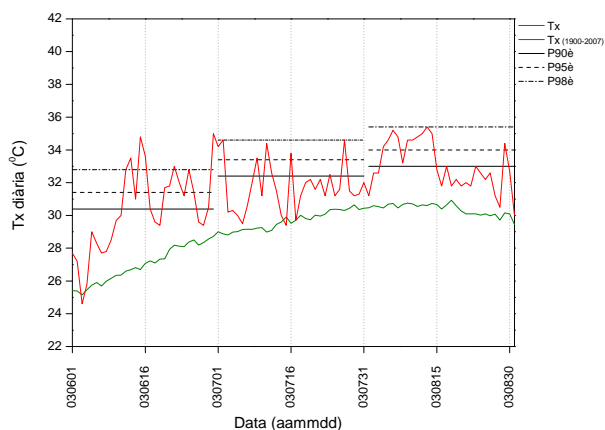


Figura 2.5 Evolució diària de Tx de l'estiu de 2003 amb els percentils 90è, 95è i 98è i evolució de Tx promig del període 1900-2007 a Alacant.

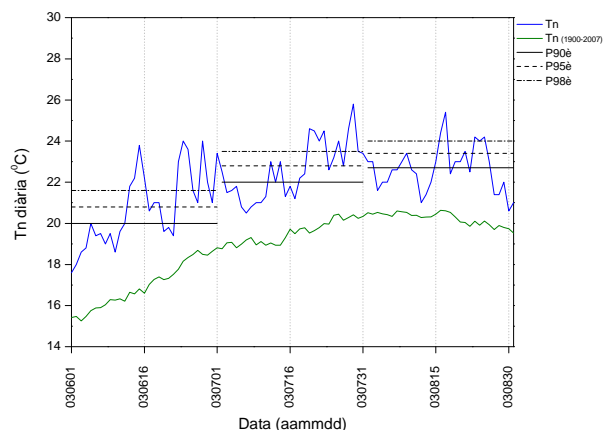


Figura 2.6 Evolució diària de Tn de l'estiu de 2003 amb els percentils 90è, 95è i 98è i evolució de Tn promig del període 1900-2007 a Alacant.



Figura 2.7 Evolució diària de Tx de l'estiu de 2003 amb els percentils 90è, 95è i 98è i evolució de Tx promig del període 1900-2007 a Múrcia.

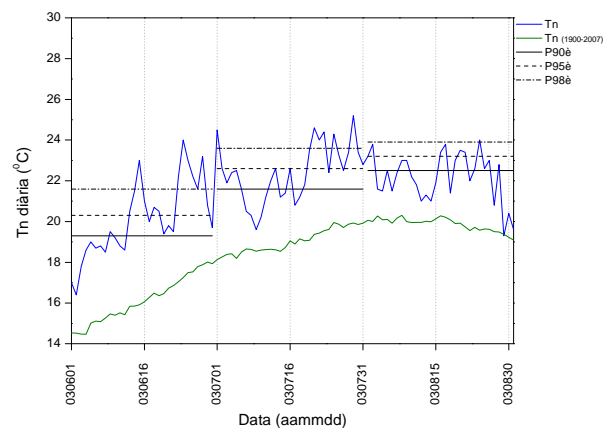


Figura 2.8 Evolució diària de Tn de l'estiu de 2003 amb els percentils 90è, 95è i 98è i evolució de Tn promig del període 1900-2007 a Múrcia.

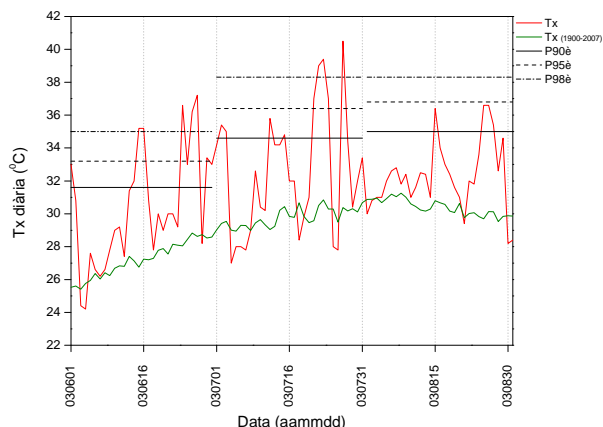


Figura 2.9 Evolució diària de Tx de l'estiu de 2003 amb els percentils 90è, 95è i 98è i evolució de Tx promig del període 1900-2007 a Màlaga.

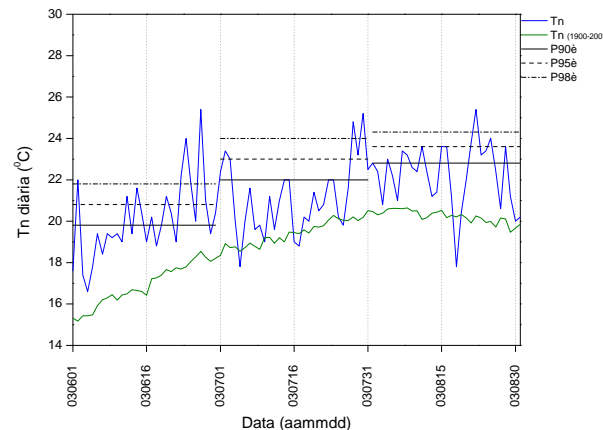


Figura 2.1 Evolució diària de Tn de l'estiu de 2003 amb els percentils 90è, 95è i 98è i evolució de Tn promig del període 1900-2007 a Màlaga.

3.2 Posant en context temporal l'onada de calor de 2003

L'evolució de les anomalies estivals de les temperatures màximes i mínimes diàries pel conjunt de la façana mediterrània de la PI es mostren a la figura 3. Com visualment es pot apreciar la mitjana de l'estiu de 2003 tant per les temperatures màximes com per a les mínimes sobresurt per sobre de la resta d'anomalies, excedint uns 3.5°C el valor normal (mitjana 1961-1990) i indicant el caràcter extrem de l'estiu de 2003.

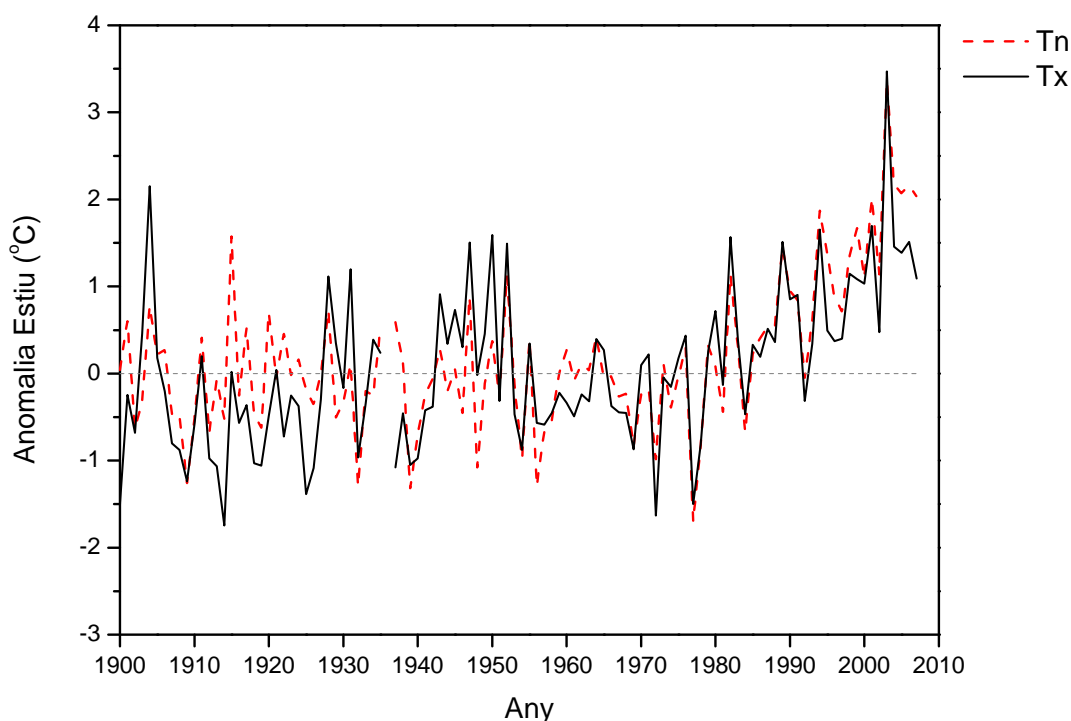


Figura 3 Evolució temporal de les anomalies de Tx i Tn de l'estiu respecte del període de referència 1961-1990 a la costa Mediterrània de la PI durant el període 1900-2007.

A continuació valorarem l'excepcionalitat de l'estiu de 2003 en la sèrie regional representativa de la costa mediterrània de la península posant-la en el context del període 1900-2007 per tal d'examinar el seu possible caràcter inusual. La figures 4 a-d mostren la distribució estadística de la T_m dels mesos de juny, juliol i agost i de l'estiu, que a partir d'ara denotarem per JJA, pel conjunt amitjanat de la basant mediterrània de la PI. En aquestes figures s'observa que la temperatura de 2003 es troba a la cua superior de la distribució en els quatre casos, lluny de la mitjana. La temperatura del mes de juny de 2003 presenta una desviació de 4.1 °C respecte la mitjana de 1900-2007, el mes de juliol de 2.8°C, l'agost de 3.0°C i per l'estiu la desviació és de 3.3°C.

Exceptuant el mes de juliol, l'estiu de 2003 ha estat el més calorós de totes les sèries analitzades. En el mes de Juliol el 2003 i el 2006 han estat els més càlids amb la mateixa temperatura mitjana, situant-se al final de la cua de la distribució.

En la taula II es mostra un resum de la informació proporcionada pels gràfics.

Taula II Desviació estàndard, anomalia de la T_m de 2003 respecte a la mitjana 1900-2007 i anomalia estandarditzada de T_m de juny, juliol i agost i de l'estiu de 2003 a la costa mediterrània.

	σ (°C)	T_m' (°C)	$\frac{T_m'}{\sigma}$
Juny	1.12	4.1	3.7
Juliol	0.97	2.8	2.9
Agost	0.90	3.0	3.3
Estiu	0.84	3.3	3.9

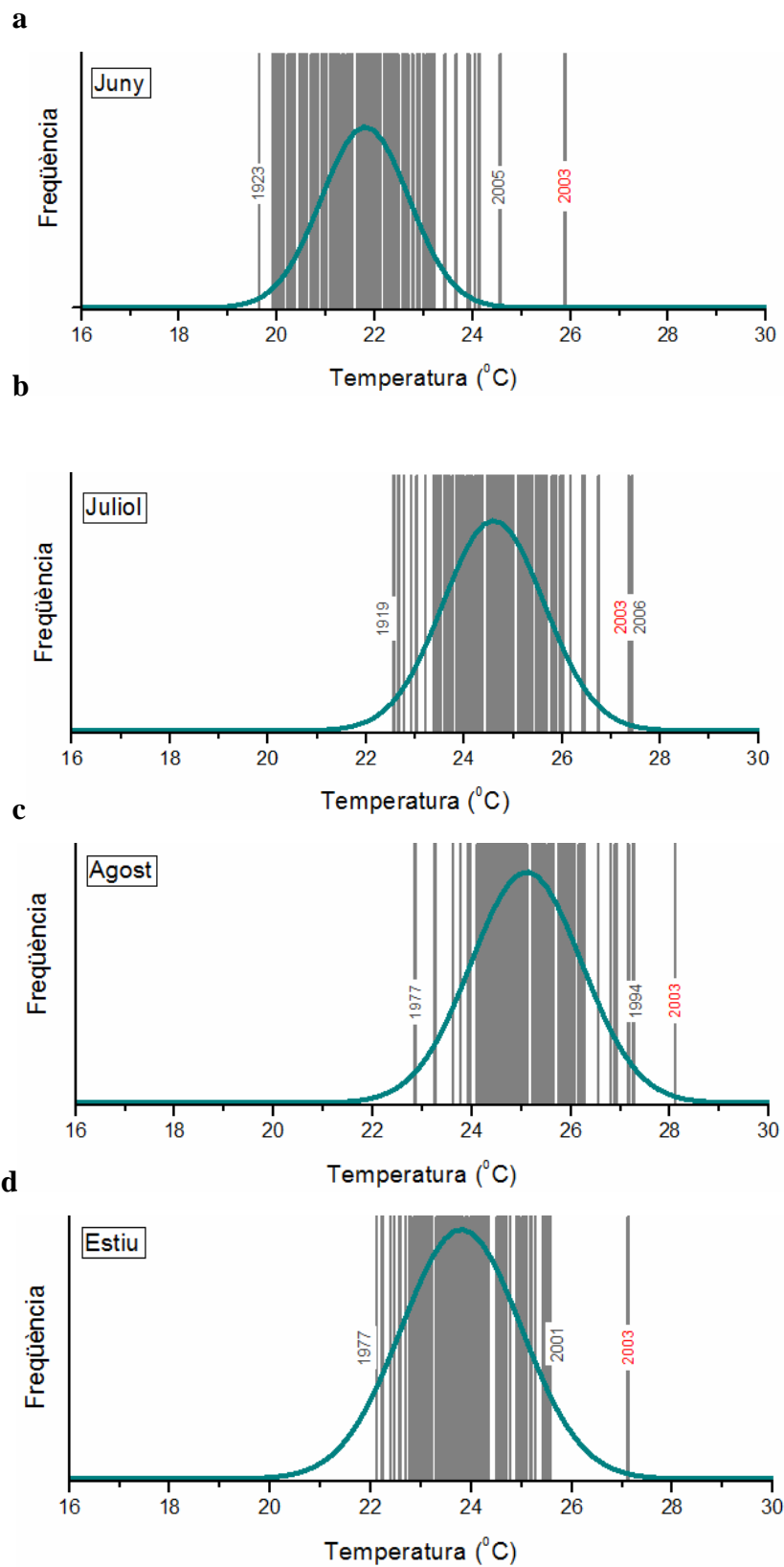


Figura 4 a-d: Distribució mensual i estacional de la Tm diària a la costa mediterrània de la PI per al període 1900-2007. En verd es mostra la distribució gaussiana corresponent.

Seguidament fem un anàlisi més detallat observatori per observatori per tal d'esbrinar diferències locals, mirem quina és l'anomalia de Tx i Tn respecte la mitjana del període 1961-1990 i quina és l'anomalia estandarditzada de l'estiu de 2003 de temperatures mitjanes, màximes i mínimes per a cada estació respecte el període 1900-2007 (Taula III).

En les últimes dècades les anomalies tèrmiques han oscil·lat pràcticament sempre per sobre de la temperatura normal (mitjana 1961-1990) a cada un dels punts considerats. Les figures 4.1-4.5 mostren les anomalies, tant de les màximes com de les mínimes d'estiu, des del 1900 fins al 2007.

A l'estiu de 2003 les anomalies de les màximes van ser destacables, de 5.5 °C a Barcelona, 4.2°C a València, 2.6°C a Alacant i a Múrcia i de 2.8°C a Màlaga, sent en tots els casos les més altes de tot el període. El promig estival de les mínimes va ser de 4.4°C per sobre de la normal a Barcelona, 3.2°C a València, 3.4°C a Alacant, 3.6°C a Múrcia i 2.3°C per sobre a Màlaga. Les mínimes també van ser destacables, no obstant a Múrcia no van ser les més altes, els anys 2006 i 2007 van sobrepassar en 4.0°C i 4.5°C respectivament.

Cal dir però que tot i que el promig d'estiu de Tx i Tn van ser rècord en quasi totes les estacions, pel que fa als valors diaris només van ser destacats a Barcelona el dia 13 d'agost de 2003 amb una Tx de 38.4°C igualant l'anterior rècord el 15 d'agost de 1987; i els dies 12, 13 i 14 d'agost de 2003 amb Tn de 27.3°C, 27.7°C i 27.8°C respectivament superant el rècord els tres dies seguits.

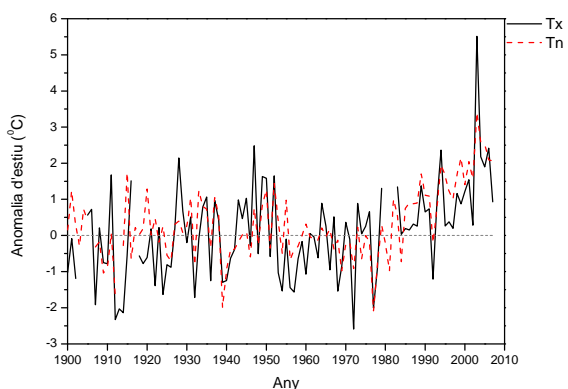


Figura 5.1 Anomalia de la temperatura màxima i mínima de l'estiu respecte la mitjana 1961-90 a Barcelona.

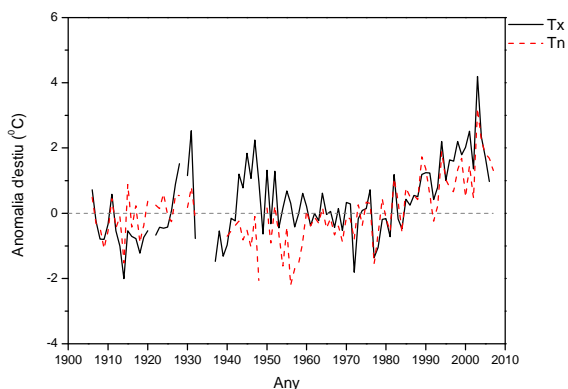


Figura 5.2 Anomalia de la temperatura màxima i mínima de l'estiu respecte la mitjana 1961-90 a València.

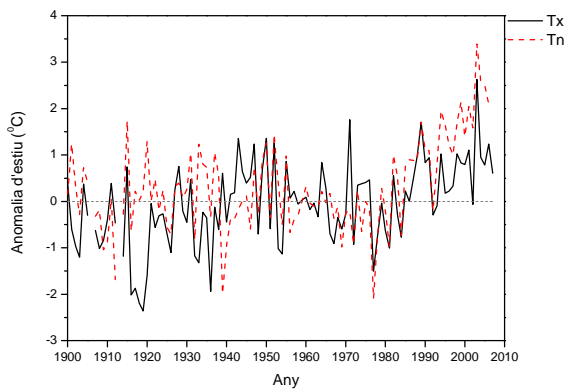


Figura 5.3 Anomalia de la temperatura màxima i mínima de l'estiu respecte la mitjana 1961-90 a Alacant.

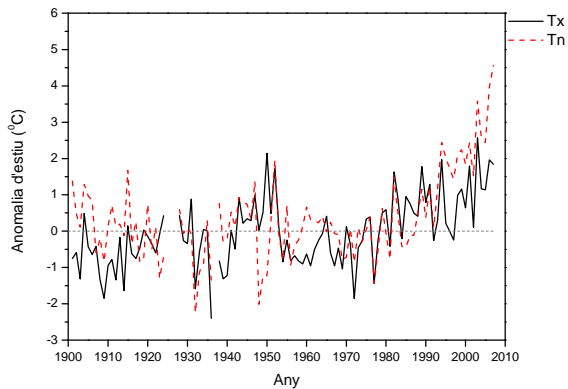


Figura 5.4 Anomalia de la temperatura màxima i mínima de l'estiu respecte la mitjana 1961-90 a Múrcia.

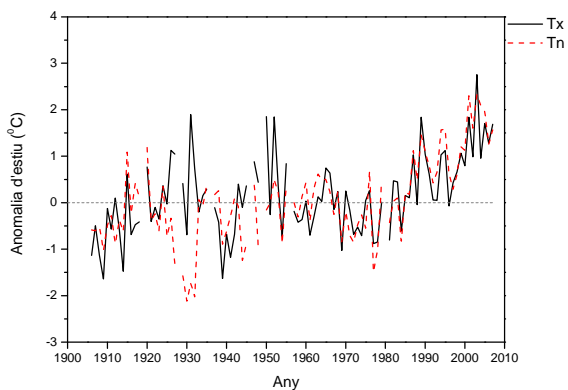


Figura 5.5 Anomalia de la temperatura màxima i mínima de l'estiu respecte la mitjana 1961-90 a Màlaga.

Taula III Desviació estàndard d'estiu (JJA) i anomalia estandarditzada de l'estiu de 2003 respecte el període 1900-2007 de cada estació per a la T_m, la T_x i la T_n.

Estació	σ JJA T _m (°C)	$\frac{T'_m}{\sigma}$	σ JJA T _x (°C)	$\frac{T'_x}{\sigma}$	σ JJA T _n (°C)	$\frac{T'_n}{\sigma}$
Barcelona	1.06	4.4	1.26	4.3	0.98	4.1
València	0.92	3.2	1.15	3.4	0.94	3.4
Alacant	0.82	3.5	0.90	3.0	0.97	3.2
Múrcia	0.95	3.0	0.95	2.7	1.17	2.7
Màlaga	0.79	3.1	0.85	3.1	0.91	2.5

Tret de les temperatures mínimes i mitjanes a Múrcia, en totes les estacions l'estiu 03 ha estat el més càlid, amb un promig estival de temperatures mínimes, màximes i mitjanes rècord de la sèrie 1900-2007. A Múrcia les temperatures mitjanes de l'estiu de 2006 han sigut les més elevades superant lleugerament el 2003, i pel que fa a les temperatures mínimes els anys 2006 i 2007 han sigut més altes també.

Les temperatures de Barcelona s'allunyen considerablement de la mitjana i es situen al voltant de 4 desviacions estàndards. En les altres estacions aquestes es troben al voltant de 3 desviacions estàndards, a la cua de les distribucions, tant els valors mitjos com els extrems.

A més a més, apliquem el test de Wilcoxon per veure si són estadísticament significatius els canvis sistemàtics de la freqüència de temperatures màximes per sobre dels percentils 90è, 95è i 98è, és a dir si el creixement d'aquests fenòmens és significatiu. Obtenim un augment significatiu en la freqüència de temperatures màximes per sobre els llindars en la majoria dels casos amb un nivell de confiança de 0.99, principalment en el mes de juny. I per a les temperatures mínimes per sobre els percentils considerats obtenim un augment molt significatiu en tots els casos amb un nivell de confiança de 0.999. A continuació les taules VI i VII mostren un resum dels resultats del test.

Taula IV + correlació positiva significativa a un nivell de significació de 0.01 de l'augment en la freqüència de Tx per sobre dels percentils 90è, 95è i 98è en els mesos d'estiu.

Estació	Significança de la freqüència de creixement								
	<u>Test de Wilcoxon</u>								
	Llindars								
	Percentil 90			Percentil 95			Percentil 98		
	Juny	Juliol	Agost	Juny	Juliol	Agost	Juny	Juliol	Agost
Barcelona	+	+	+	+	+	+	+	+	+
València	+	+	+	+			+	+	
Alacant	+	+		+			+		
Múrcia	+	+		+	+			+	
Màlaga	+	+	+	+	+	+	+	+	

Taula V + correlació positiva significativa al nivell de significació de 0.001 de l'augment en la freqüència de Tn per sobre dels percentils 90è, 95è i 98è en els mesos d'estiu.

Estació	Significança de la freqüència de creixement								
	<u>Test de Wilcoxon</u>								
	Llindars								
	Percentil 90			Percentil 95			Percentil 98		
	Juny	Juliol	Agost	Juny	Juliol	Agost	Juny	Juliol	Agost
Barcelona	+	+	+	+	+	+	+	+	+
València	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Alacant	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Múrcia	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Màlaga	+	+	+	+	+	+	+	+	+

3.3 Evolució dels extrems càlids a partir d'indicadors climàtics

Després d'analitzar l'estiu de 2003 amb la seva anomalia tèrmica i la distribució de freqüències, el nostre objectiu és valorar l'onada de calor que va tenir lloc entre juny i agost d'aquest any a la costa.

Hi ha moltes formes de definir una onada de calor estadísticament, nosaltres hem adoptat la definició següent: 6 dies o més consecutius amb la T_x per sobre del percentil 90è, $T_x > \text{percentil } 90^{\text{è}}$. El fet de considerar com a llindar el percentil 90è en comptes d'un valor constant igual per a totes les estacions ens permet tenir en compte les condicions climàtiques locals de cada zona.

Així, tal com l'hem definit, al nord de la costa hi ha moltes més onades de calor estivals que al sud, i a mesura que baixem en latitud aquestes són menys freqüents.

A Barcelona estius amb onades de calor són comuns. Aquestes estan distribuïdes al llarg de la sèrie, si bé en l'última dècada hi ha hagut més onades seguides (veure figura 6.1). En l'any 2003 s'observen molts més dies amb la temperatura màxima per sobre del percentil 90è respecte el promig anual del període 1961-1990, de 8 dies enfront dels 65 observats aquest estiu. Dels 65 dies 43 van superar el llindar amb una persistència que superava els 6 dies consecutius, sent l'onada de calor més persistent.

Si considerem les ratxes de nits càlides de 6 ó més dies amb la T_n per sobre del percentil 90è en l'última dècada han sigut més seguides. Destaca l'estiu de 2003 amb 61 dies per sobre del percentil 90è quan la mitjana estival del trentenni 1961-1990 és de 7 dies. A més en 51 dels 61 dies la temperatura mínima ha sigut superior al llindar almenys 6 dies consecutius (veure figura 7.1).

A uns 400 km més al sud per la costa ens trobem València on les onades no són tant comunes, tot i que cal destacar les onades del 2001, 2003 i del 2005. L'estiu de 2003 va tenir un total de 58 dies amb les temperatures màximes per sobre el percentil 90è, 42 dels quals amb almenys 6 dies consecutius, rècord de la sèrie (figura 6.2).

En aquest indret és també important el seguit de ratxes de nits càlides en els últims anys, sobretot a l'estiu de 2003 que hi va haver 54 dies amb la $T_n > P90^{\text{è}}$ quan la mitjana anual és de 7 i 36 dies amb ratxes de 6 ó més dies consecutius (figura 7.2).

Un poc més al sud, a la costa blanca, es troba Alacant on en general el nombre de dies per sobre el llindar és més elevat que a València però les onades de calor són esporàdiques. A l'estiu en estudi hi va haver 34 dies que superen el percentil 90è, 18 amb 6 ó més dies per sobre el llindar (figura 6.3).

En quan a les ratxes de nits càlides s'observen a partir de l'any 1986 i a partir de l'any 2000 n'hi ha cada any. Novament el 2003 ha estat el més important amb 31 dies amb almenys 6 dies consecutius amb la mínima superior a la temperatura llindar. Destaquen els 47 dies amb les mínimes per sobre el llindar amb una mitjana anual de 6 dies (figura 7.3).

Els estius a Múrcia solen ser calorosos i acostuma a haver dies amb màximes elevades però les onades de calor, tal com les hem definit són fenòmens aïllats, l'última va ocórrer l'estiu de 2001 i al 2003 no hi va haver cap (figura 6.4).

Per altra banda, en tota la sèrie estudiada la primera ratxa de nits càlides s'observa l'any 1991 i a partir de llavors aquestes han sigut habituals. A l'estiu en estudi hi va haver 54 dies amb la temperatura superior al percentil 90è quan la mitjana anual és de 4 dies. I hi va haver 33 dies amb almenys 6 dies consecutius. Tot i què les nits d'aquest estiu no han estat les més caloroses, l'estiu del 2006 i 2007 van tenir nits molt càlides amb ratxes més llargues (figura 7.4).

Al sud de la península, a la riba nord del mar d'Alboran es troba Màlaga, en aquest indret tot i què les temperatures són elevades no s'observa cap onada de calor des de 1900 fins al 2007 (figura 6.5). Pot ser que hi hagi dies consecutius amb la temperatura per sobre el percentil 90è però menys de 6.

Respecte a les ratxes de nits càlides malgrat que n'hi ha hagut alguna d'esporàdica durant tot el període aquestes han sigut habituals a partir de l'any 2000, amb ratxes quasi cada estiu. L'estiu de 2003 va tenir una ratxa de 6 dies consecutius, tot i que no és la més llarga, en l'any 2005 va ser un poc més llarga (figura 7.5).

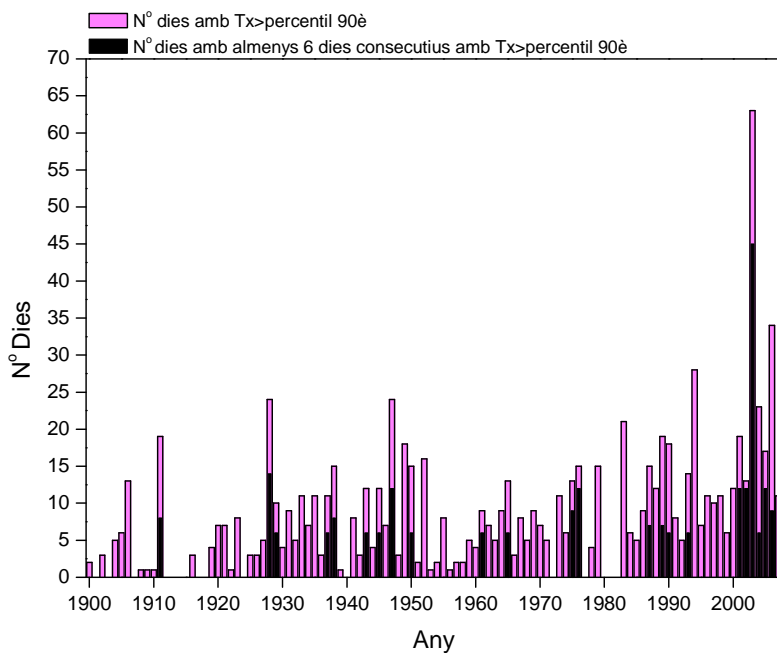


Figura 6.1 N° de dies càlids i onades de calor a Barcelona

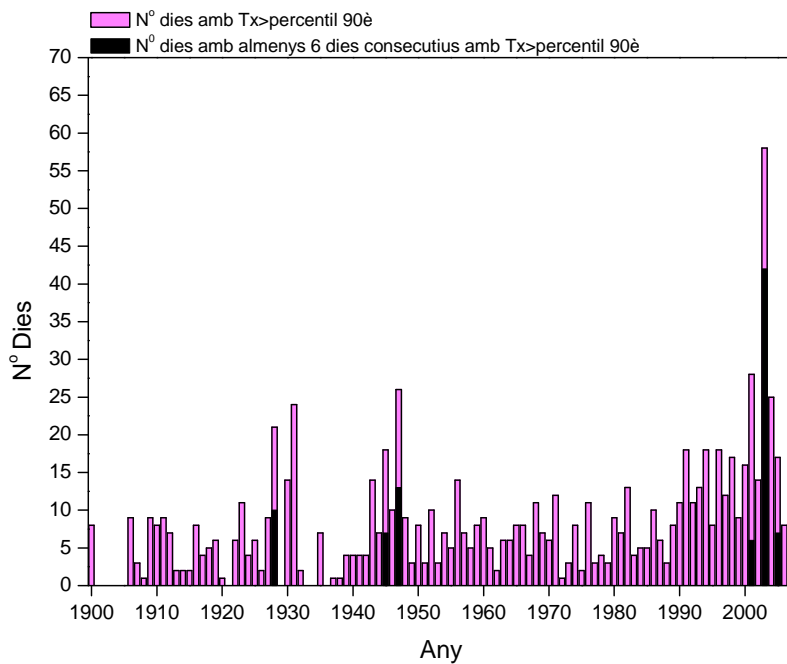


Figura 6.2 N° de dies càlids i onades de calor a València

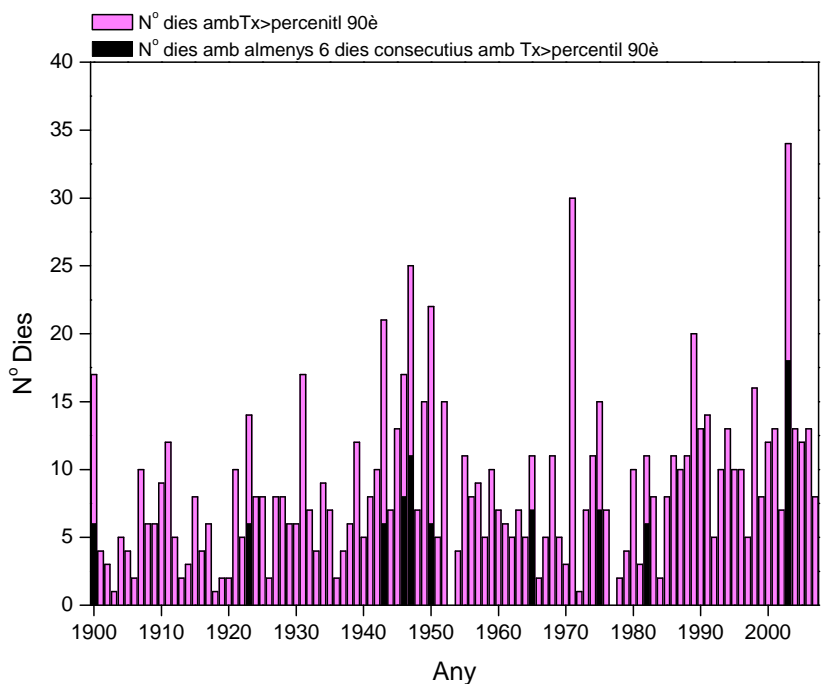


Figura 6.3 Nº de dies càlids i onades de calor a Alacant.

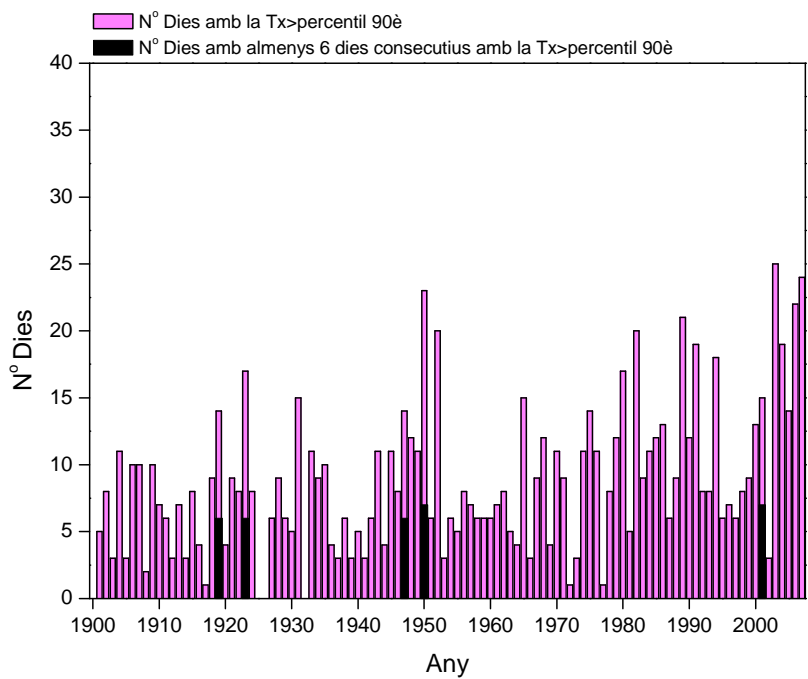


Figura 6.4 N° de dies càlids i onades de calor a Múrcia

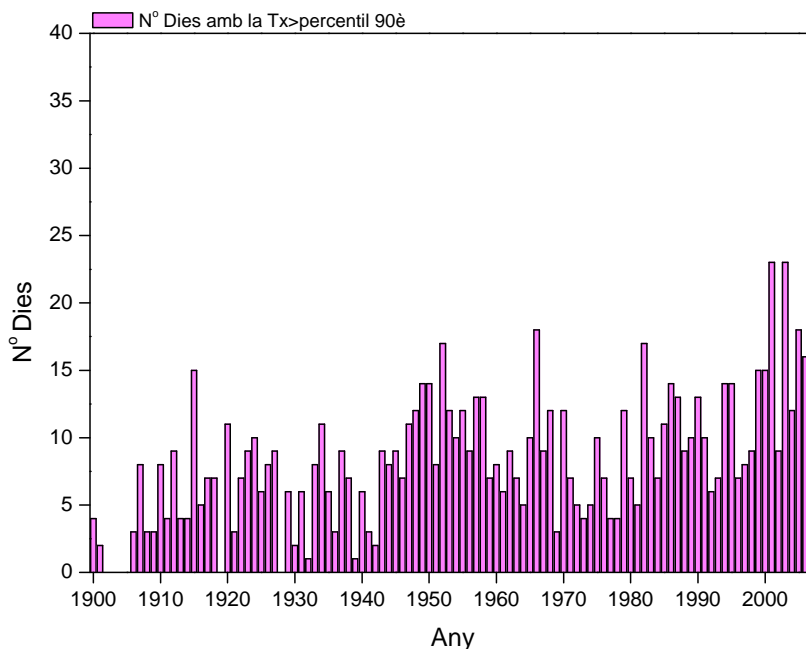


Figura 6.5 N° de dies càlids i onades de calor a Màlaga.

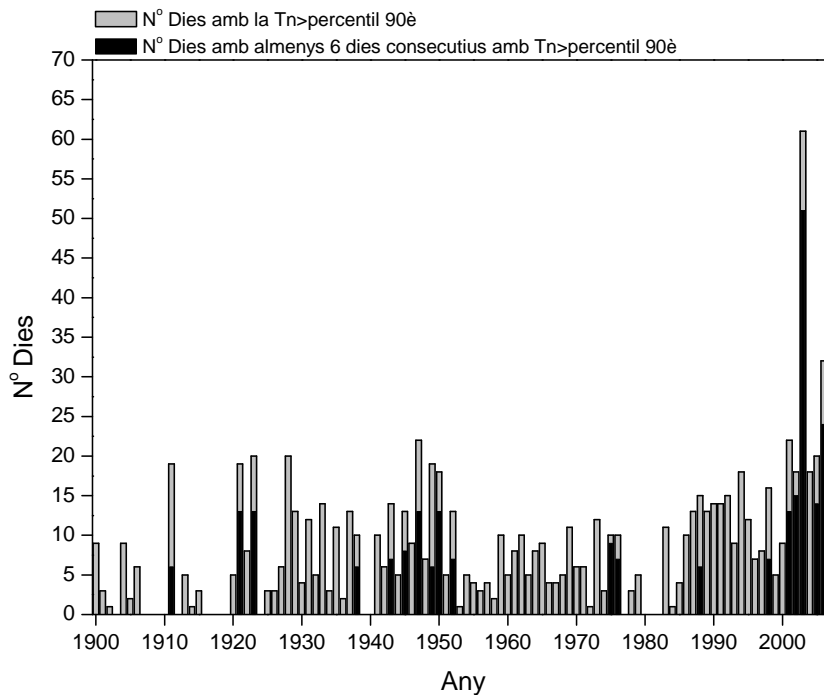


Figura 7.1 N° de nits càlides i ratxes de nits càlides a Barcelona

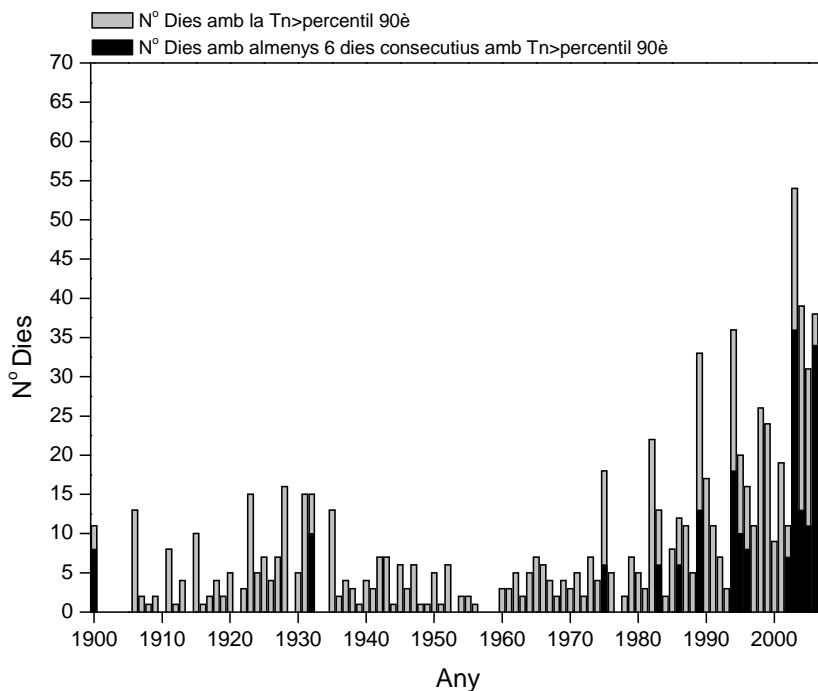


Figura 7.2 N° de nits càlids i ratxes de nits càlides a València

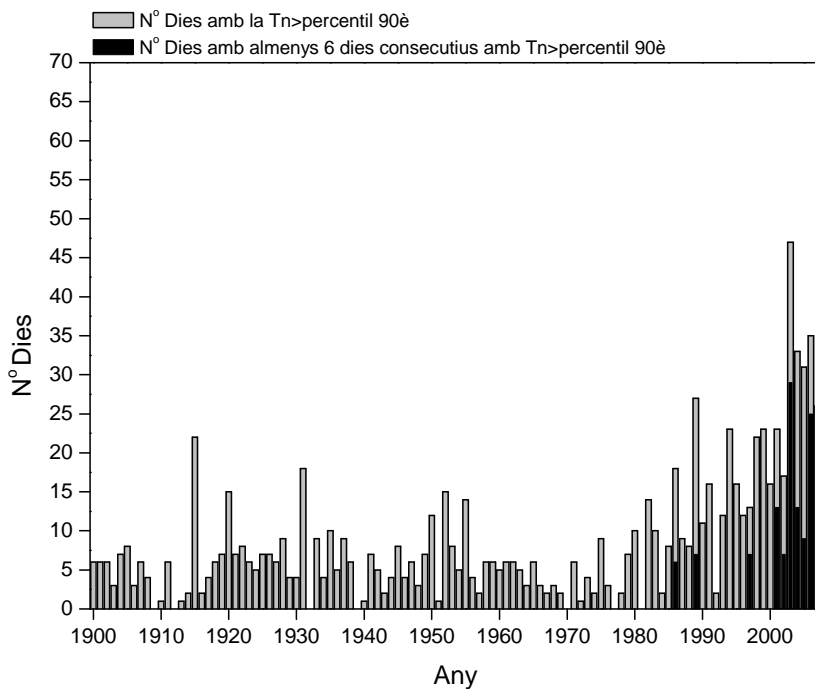


Figura 7.3 N° de nits càlides i ratxes de nits càlides a Alacant

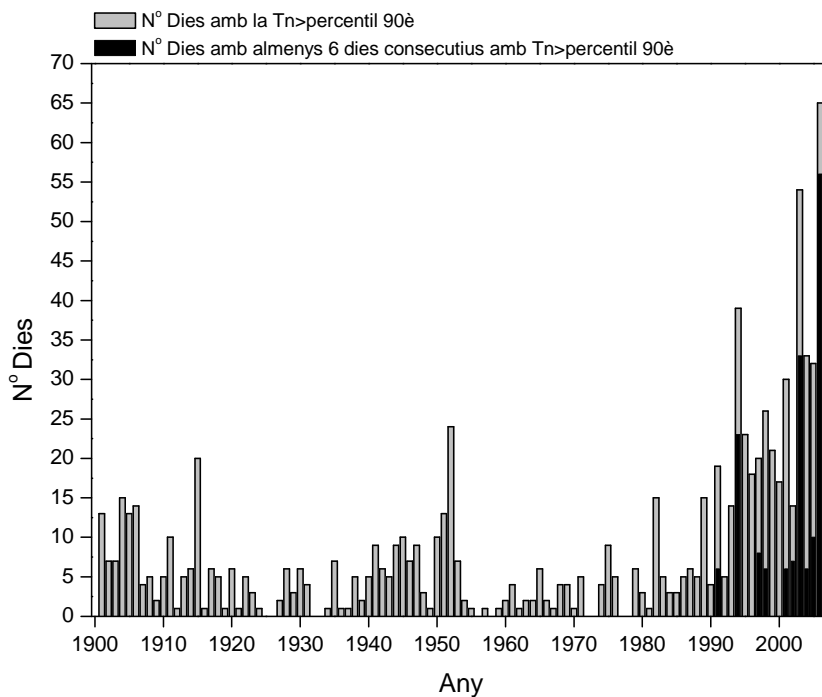


Figura 7.4 N° de nits càlides i ratxes de nits càlides a Múrcia

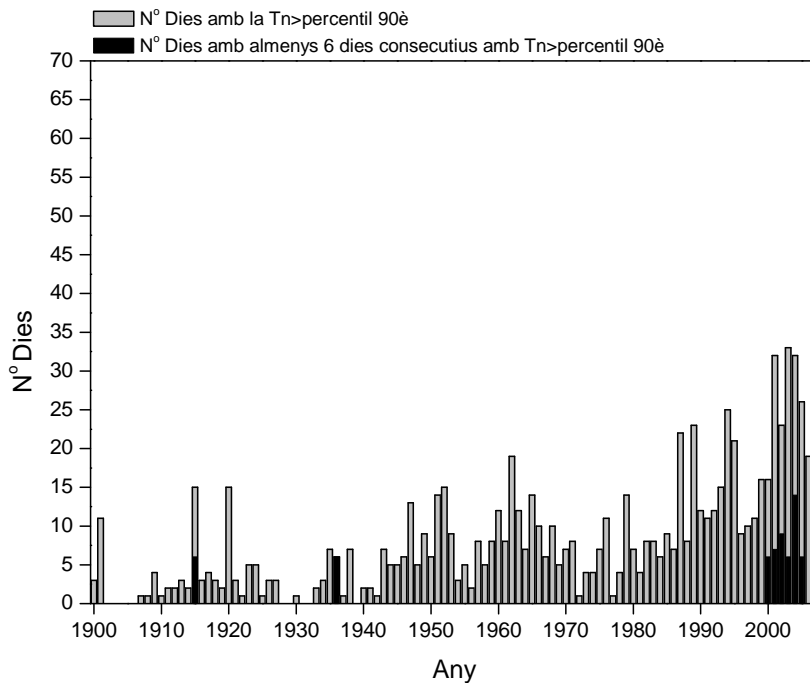


Figura 7.5 N° de nits càlides i ratxes de nits càlides a Màlaga.

Taula VI promig (61-90) de nº de dies a l'estiu amb $T_x > P_{90}$, nº de dies amb $T_x > P_{90}$ a l'estiu de 2003 i onades de calor a l'estiu de 2003 a cada observatori.

Estacions	Nº dies amb	Nº dies amb	Nº dies ≥ 6 amb	
	$T_x >$ Percentil 90è promig 1961-1990	$T_x >$ Percentil 90è JJA 2003	$T_x >$ Percentil 90è JJA 2003	
Barcelona	8	65	9,9,15,10	43
València	6	58	6,12,15,9	42
Alacant	8	34	7,11	18
Múrcia	9	25	0	0
Màlaga	9	23	0	0

Taula VII promig (61-90) de nº de dies a l'estiu amb $T_n > P_{90}$, nº de dies amb $T_n > P_{90}$ a l'estiu de 2003 i ratxes de nits càlides a l'estiu de 2003 a cada observatori.

Estacions	Nº dies amb	Nº dies amb	Nº dies ≥ 6 amb	
	$T_n >$ Percentil 90è 1961-1990	$T_n >$ Percentil 90è JJA 2003	$T_n >$ Percentil 90è JJA 2003	
Barcelona	7	61	10,11,6,15,9	51
València	7	54	18,18	36
Alacant	6	47	7,8,16	31
Múrcia	4	54	18,15	33
Màlaga	9	33	6	6

4 Conclusions

L'episodi de calor viscut l'estiu de 2003 va afectar la façana mediterrània de la PI i va ser inusual a tota la costa tot i que més al nord. Hi van haver onades de calor llargues i intenses a Barcelona, València i Alacant principalment en el mes de juny i agost. Al sud les temperatures van ser elevades, si bé la persistència va ser menor, alternant dies molt calorosos amb d'altres de no tant i no hi va haver onades de calor, tal com les hem definit, tenint en compte que al sud de la península les temperatures a l'estiu són elevades i és difícil superar el percentil 90è ja que aquest és molt alt.

Hem de dir que aquest episodi no tant sols es va caracteritzar per temperatures màximes elevades sinó que les mínimes van ser molt intenses i persistents en tots els observatoris inclòs amb ratxes llargues al sud, fet que va provocar que l'episodi fos extremadament calorós.

També en totes les estacions l'anomalia del promig estival de Tx i Tn va batre rècords, a més el promig estival 2003 i mensual, juny, juliol i agost, de Tx, Tn i Tm es troba a la cua de la distribució estadística de freqüències respectiva, fets que confirmen la singularitat de l'esdeveniment.

Els dies càlids ($T_x > P_{90}$) augmenten significativament al llarg del període en tota la costa els mesos de juny i juliol i en els dos extrems del litoral el mes d'agost. Per altra banda, les nits càlides ($T_n > P_{90}$) augmenten molt significativament els tres mesos d'estiu i en l'última dècada hi ha un augment considerable de les nits càlides arreu amb ratxes llargues.

L'estiu analitzat va ser el més càlid de tota la sèrie en tots els observatoris i les onades de calor a Barcelona, València i Alacant van ser les més persistents des de 1900, sobretot a Barcelona on van ser a més de persistents molt intenses.

Resumint, l'estiu de 2003 a la façana mediterrània de la PI es va caracteritzar per la persistència del calor, sobretot en la meitat nord, ja que encara que no va trencar rècords diaris si que va superar i trencar els rècords dels promitjos mensuals i estacionals.

Val a dir que aquests fenòmens podrien repetir-se en un futur i ser un exemple d'estiu en un clima d'efecte hivernacle (Beniston et al., 2004).

En futurs estudis s'investigarà l'atribució de causes de l'augment de fenòmens extrems així com els mecanismes responsables per la seva evolució futura, seguint i contrastant els estudis fets (Brunet et al., 2007; Fischer et al., 2010; Della Marta et al., 2007). També seria interessant veure mitjançant models climàtics si aquests seran freqüents en els pròxims anys tant a la costa Mediterrània com en el conjunt d'Espanya per tal d'ajudar en la predicció d'ocurrència d'aquests episodis i desenvolupar maneres per millorar l'adaptació.

5 Referències

Abaurrea, J., Asín, J., Cebrián, A. C., Centelles, A. (2004). Modeling and projecting extreme hot events in the central Ebro valley, a continental-Mediterranean area. *Global and Climate Change* 57:43-58.

Alexander LV, et al (2006) Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation. *J Geophys Res* 111:D05109.

Beniston M (2004) The 2003 heat wave in Europe: a shape of things to come? An analysis based on Swiss climatological data and model simulations. *Geophys Res Lett* 31:2202–2202

Beniston, M., and H. Diaz (2004), The 2003 heat wave as an example of summers in a greenhouse climate? Observations and climate model simulations for Basel, Switzerland. *Global Planet. Change* 44:73– 81.

Black, E., M. Blackburn, G. Harrison, and J. Methven, 2004: Factors contributing to the summer 2003 European heatwave. *Weather* 59: 217–223.

Brunet M., O. Saladié, P. Jones, **J. Sigró**, **E. Aguilar**, A. Moberg, D. Lister, A. Wather and C. Almarza. 2008. A case-study/guidance on the development of long-term daily adjusted temperature datasets. World Meteorological Organization, WMO-TD- 1425/WCDMP-66, Geneva, 43 pp.

Brunet M., O. Saladié, P. Jones, J. Sigró, E. Aguilar, A. Moberg, D. Lister, A. Walther and C. Almarza. 2006. The development of new dataset of Spanish Daily Adjusted Temperatura series (SDATS) (1850-2003). *Int J Climatol* 26:1777-1802.

Brunet M, J. Sigró, P. Jones, O. Saladié, E. Aguilar, A. Moberg, D. Lister and A. Walther. 2007. Long-term changes in extreme temperatures and precipitation in Spain. *CONTRIBUTIONS to SCIENCE* 3 (3): 333–344.

Della-Marta P.M., M. R. Haylock, J. Luterbacher, and H. Wanner. (2006b). Doubled length of Western European summer heat waves since 1880, *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*. *J Geophys Res* 112: D15103, doi:10.1029/2007JD008510.

Della-Marta P.M., J. Luterbacher, H. von Weissenfluh, E. Xoplaki, M. Brunet, and H. Wanner. (2006a). Summer heat waves over western Europe 1880-2003, their relationship to large scale forcings and predictability, *Climate Dynamics*, doi: 10.1007/s00382-007-0233-1.

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

Fink, A. H., T. Brücher, A. Krüger, G. C. Leckebusch, J. G. Pinto, and U. Ulbrich (2004), The 2003 European summer heatwaves and drought: Synoptic diagnosis and impacts. *Weather* 59: 209– 216.

Fischer, E. M., and C. Schär (2010). Consistent geographical patterns of changes in high-impact European heatwaves. *Nature Geoscience* 3:398 – 403.

Fischer, E. M., S. I. Seneviratne, D. Luthi, and C. Schär (2007), Contribution of land-atmosphere coupling to recent European summer heat waves, *Geophys. Res. Lett.* 34: L06707, doi:10.1029/2006GL029068.

Jones PD, Hulme M. 1996. Calculating regional climatic time series for temperature and precipitation: methods and illustrations. *International Journal of Climatology* 16: 361– 377.

Luterbacher, J., D. Dietrich, E. Xoplaki, M. Grosjean, and H. Wanner(2004). European seasonal and annual temperature variability, trends, and extremes since 1500. *Science* 303:1499–1503.

Meehl, G. A., and C. Tebaldi (2004), More intense, more frequent, and longer lasting heat waves in the 21st century, *Science* 305, 994–997.

Schär C, Vidale P, Lüthi D, Frei C, Häberli C, Liniger M, Appenzeller C (2004) The role of increasing temperature variability in European summer heatwaves. *Nature* 427:332–336.

Szinell Cs, Bussay A, Szentimrey T. 1998. Drought tendencies in Hungary. *Int J Climatol* 18: 1479–1491.

IPCC Fourth Assessment Report: *Understanding and Attributing Climate Change* (Chapter 9)

<http://cccma.seos.uvic.ca/ETCCDI/>

Agraïments

M'agradaria agrair a tots els que han fet possible que fes aquest treball.

En primer lloc a la meva tutora la Dra. Manola Brunet India per haver-me guiat, assessorat i animat en la realització del treball i també per haver-me facilitat les dades necessàries.

Als meus companys/es del Centre for Climate Change (C3) que m'han ajudat amb el seu coneixement i sobretot amb la seva acollida al meu nou lloc de treball.

Als meus companys/es del Servei Meteorològic de Catalunya per tot el que em van ensenyar en la meva estància.

Als meus companys/es de Màster pels moments compartits durant el curs, el suport i els ànims.

A la meva família perquè sempre han estat allí, pel seu recolzament i els seus consells que han sigut molt importants per a mi.

Als meus amics/gues pels bons moments viscuts.

I finalment i molt especialment a la meva amiga Graci Gómez per haver-me animat, recolzat i ajudat i tot lo que fes falta incondicionalment en l'últim tram de la carrera i en el Màster.

Moltes gràcies!

Mercè Castellà Sánchez

Setembre 2010