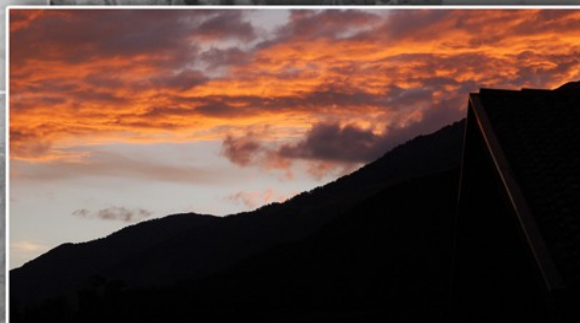
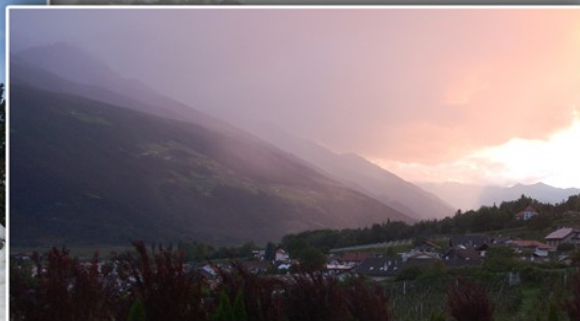




ISPRA

Istituto Superiore per la Protezione
e la Ricerca Ambientale

Variazioni e tendenze degli estremi di temperatura e precipitazione in Italia



STATO DELL'AMBIENTE

Informazioni legali

L'Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale (ISPRA) e le persone che agiscono per conto dell'Istituto non sono responsabili per l'uso che può essere fatto delle informazioni contenute in questo rapporto.

ISPRA – Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale
Via Vitaliano Brancati, 48 – 00144 Roma
www.isprambiente.gov.it

ISPRA, Stato dell'Ambiente 37/2013

ISBN 978-88-448-0599-9

Riproduzione autorizzata citando la fonte

Elaborazione grafica

ISPRA

Grafica di copertina: Franco Iozzoli

Foto di copertina: Franco Desiato, Franco Iozzoli

Coordinamento editoriale:

Daria Mazzella

ISPRA - Settore Editoria

Luglio 2013

Autori

Guido Fioravanti, Emanuela Piervitali, Franco Desiato, Walter Perconti, Piero Fraschetti (ISPRA)

Indice

1. INTRODUZIONE.....	5
2. SERIE DI DATI	6
2.1 Criteri di selezione delle serie annuali	6
2.2 Verifica dell'omogeneità delle serie di temperatura.....	6
2.3 Selezione delle serie giornaliere	12
3. INDICI DEGLI ESTREMI CLIMATICI.....	16
3.1 Gli indici degli estremi climatici definiti dall'ETCCDI	16
3.2 Gli indici degli estremi climatici per l'Italia	19
4. METODO DI CALCOLO DEI TREND.....	22
4.1 Estremi di temperatura.....	22
4.2 Estremi di precipitazione	22
4.3 Analisi dei trend e significatività	22
5. RISULTATI	24
5.1 Indici di temperatura	24
5.2 Indici di precipitazione.....	45
6. CONCLUSIONI.....	58
Riferimenti bibliografici	59

1. INTRODUZIONE

La conoscenza del clima presente e passato permette di identificare e stimare gli impatti dei cambiamenti climatici già avvenuti e di quelli in corso. Se le proiezioni del clima futuro si basano sull'impiego dei modelli numerici, la conoscenza del clima degli ultimi decenni e delle tendenze in corso si fondano sul monitoraggio delle variabili meteorologiche, cioè sulle serie di osservazioni. Le serie temporali di dati climatici vengono elaborate utilizzando metodi e modelli statistici per produrre indicatori rappresentativi dello stato e delle variazioni del clima a diverse scale, da quella globale a quella locale.

La variabilità climatica riguarda sia i valori medi delle variabili climatiche che le loro distribuzioni statistiche e, in particolare, i valori estremi. La conoscenza degli estremi meteorologici e delle loro variazioni ha particolare rilevanza nella definizione delle strategie di adattamento ai cambiamenti climatici; infatti, gli eventi estremi sono spesso causa di impatti negativi rilevanti sulla salute, le attività economiche, il territorio, l'ambiente e la società in genere.

Il maggior numero di indici di estremi climatici definiti, calcolati e studiati alle diverse scale, riguarda la temperatura e le precipitazioni (Frich et al., 2002; Kostopoulou e Jones, 2005; Alexander et al., 2006; Tomozeiu et al., 2006). Gli estremi di temperatura vengono valutati anche in relazione all'aumento della temperatura media globale negli ultimi decenni, e rappresentano una causa potenziale di impatti sulla salute, sul consumo di energia, sull'agricoltura e sul turismo; gli estremi di precipitazione hanno importanti riflessi sulle emergenze e il dissesto di natura idrogeologica e sulla gestione delle risorse idriche.

Lo studio degli estremi è più difficile rispetto allo studio delle medie climatiche perché richiede la disponibilità di serie di dati ad elevata risoluzione temporale e spaziale, oltre che sufficientemente complete e di qualità controllata. Se non sono soddisfatti tali requisiti, è praticamente impossibile stimare in modo affidabile le variazioni e le tendenze degli estremi climatici.

Nel presente rapporto vengono trattati gli indici di estremi di temperatura e precipitazione in Italia nell'ultimo mezzo secolo, nei limiti delle serie di dati disponibili. Nel capitolo 2 vengono descritti i dati utili in ingresso e i criteri di selezione delle serie ai fini del calcolo degli indici. Nel capitolo 3 vengono presentati gli indici standard definiti dai gruppi di lavoro internazionali e quelli calcolati per l'Italia in base ai dati disponibili; nel capitolo 4 vengono descritti i metodi e i programmi di calcolo delle serie di indici e nel capitolo 5 vengono presentati i risultati: per ciascun indice, la variazione nell'ultimo mezzo secolo su ciascun punto-stazione e l'andamento temporale medio in Italia.

2. SERIE DI DATI

2.1 Criteri di selezione delle serie annuali

La stima degli estremi di temperatura e precipitazione e lo studio della loro variabilità richiede l'analisi di lunghe serie di dati giornalieri, che devono soddisfare criteri rigorosi di qualità, completezza e continuità.

Ai fini di questo lavoro, mediante un'interrogazione al database del sistema SCIA (Desiato 2007; Desiato et al., 2006, 2007, 2011) è stato identificato un primo set di stazioni le cui serie annuali di temperatura e precipitazione soddisfano i criteri suddetti; successivamente, da questo insieme sono state prese in esame le stazioni che dispongono di serie di dati giornalieri anch'esse oggetto di verifica (v. 2.3).

Per quanto riguarda la qualità dei dati, essi vengono dapprima sottoposti a molteplici controlli di validità da parte degli organismi titolari delle reti di monitoraggio. Successivamente, ulteriori verifiche vengono effettuate nella fase di calcolo degli indicatori del sistema SCIA.

Per quanto riguarda la completezza e la continuità dei dati, le serie annuali sono state selezionate sulla base dei criteri già definiti per l'elaborazione e la stima delle tendenze delle serie annuali di temperatura media e precipitazione cumulata (Desiato et al., 2012). In particolare, le serie annuali individuate soddisfano i seguenti requisiti: 1) hanno un numero minimo di dati disponibili pari all'86% della lunghezza della serie stessa; 2) hanno al loro interno un numero massimo di 4 anni consecutivi mancanti; 3) non terminano prima del 2007. L'anno di inizio delle serie che garantisce un numero abbastanza consistente di dati validi in base ai criteri sopra descritti è il 1961, che corrisponde anche all'anno di inizio del trentennio climatologico di riferimento per il calcolo dei valori normali secondo gli standard dell'Organizzazione Meteorologia Mondiale (OMM).

In questo modo si è ottenuto un insieme 93 stazioni per la temperatura minima, un insieme di 93 stazioni per la temperatura massima (non esattamente coincidenti con le precedenti) e un insieme di 116 stazioni per la precipitazione cumulata.

2.2 Verifica dell'omogeneità delle serie di temperatura

La verifica dell'omogeneità delle serie climatiche è un requisito fondamentale per lo studio dell'evoluzione del clima e in particolare per lo studio delle variazioni degli eventi estremi.

Si definisce "omogenea" una serie temporale in cui la variabilità del segnale dipende esclusivamente da fattori climatici. Tuttavia non è insolito che fattori esterni, anche di natura antropica, possano alterare il segnale di una serie, con evidenti ripercussioni sulla stima dei trend. Le cause più frequenti di disomogeneità artificiali (*breakpoint*) nelle serie temporali sono lo spostamento della stazione di misura, la sostituzione della strumentazione, cambiamenti nell'esposizione dello strumento, adozione di nuove procedure di elaborazione dei dati. Le informazioni che documentano la storia delle stazioni di rilevamento (metadati) costituiscono un importante supporto per lo studio dell'omogeneità di una serie. Al fine di ovviare alla totale mancanza o alla limitata disponibilità di metadati, sono state proposte varie tecniche statistiche per valutare l'omogeneità delle serie mensili e annuali (Aguilar et al., 2003), con particolare riguardo alle serie di temperatura. Nonostante l'ampia letteratura prodotta, nessuna delle metodologie finora proposte si è imposta come la migliore in assoluto. Alcune tecniche di analisi sono comunque ben consolidate e riconosciute dalla comunità scientifica come "standard" (Reeves et al., 2007). Poiché due diversi metodi applicati a una stessa serie di dati possono produrre risultati differenti, se non addirittura discordanti, si ritiene di buon senso prendere in esame i risultati di più tecniche di analisi, con il supporto dei metadati se disponibili (Wijngaard et al., 2003).

Il problema dell'omogeneizzazione si complica ulteriormente quando si passa dalla scala annuale e mensile a quella giornaliera. Infatti, l'elevata variabilità che caratterizza le serie dei dati giornalieri può produrre nella serie discontinuità climatiche difficilmente distinguibili da discontinuità artificiali. In mancanza di una metodologia condivisa per l'identificazione e, soprattutto, per la correzione delle disomogeneità su scala giornaliera, l'OMM (Klein Tank et al., 2009) suggerisce di escludere dall'analisi climatologica le serie che presentano evidenti discontinuità artificiali o, in alternativa, di considerarle solo la parte omogenea.

Ai fini di questo lavoro, la verifica dell'omogeneità delle serie di temperatura minima e massima è stata effettuata su scala annuale, assumendo che serie prive di *breakpoint* a livello annuale possano essere considerate omogenee anche a livello giornaliero (Vincent, 1998; Alexander et al., 2006). Inoltre, si deve osservare che all'estremo opposto della corretta identificazione di disomogeneità delle serie vi è il rischio di "*overadjustment*",

ovvero di eccessiva o errata correzione del segnale climatico (Dai et al., 2011). Ad esempio, alcuni test preliminari applicati alle nostre serie giornaliere di temperatura (t-Test e dell’F-test, v. oltre) restituiscono un numero eccessivo di *breakpoint* di cui risulta difficile valutare la bontà in mancanza di metadati.

Le serie di precipitazione non sono state invece sottoposte ai test di omogeneità a causa della forte variabilità temporale e spaziale che caratterizza tale parametro e quindi delle difficoltà e incertezze nell’identificazione di *breakpoint* in mancanza di metadati.

Per valutare l’omogeneità delle serie di temperatura sono stati presi in esame tre diversi test statistici: il *penalized t-test* (Wang et al. 2007), il *penalized F-test* (Wang, 2008) e il metodo di Vincent (Vincent, 1998). Il *penalized t-test* e il *penalized F-test*, già applicati per l’omogeneizzazione delle serie annuali di temperatura media, sono implementati all’interno del pacchetto software RHtestV3 disponibile sul sito del “CCI/CLIVAR/JCOMM – ETCCDI” al link <http://etccdi.pacificclimate.org/software.shtml>.

Il *penalized t-test* è un metodo “relativo”, che si basa cioè sul confronto fra serie candidata (la serie oggetto di studio) e serie di riferimento (una serie costruita in modo da essere rappresentativa del clima della regione in cui si trova la stazione candidata e allo stesso tempo priva di disomogeneità). Il *penalized F-test* è invece un metodo “assoluto”, ovvero un test di autoconsistenza della serie. Per una breve descrizione dei due test statistici e della metodologia applicata per la creazione delle serie di riferimento si rimanda a Desiato et al. (2012).

Il test di Vincent affronta il problema della disomogeneità in termini di modelli di regressione, in cui la variabile dipendente e quella indipendente sono rispettivamente rappresentate dalla serie candidata e dalla serie di riferimento. Una serie candidata i cui “residui” di regressione sono affetti da autocorrelazione viene considerata disomogenea. Vincent ha illustrato il suo metodo per l’identificazione e la correzione delle disomogeneità a livello annuale, mensile e giornaliero in diversi articoli (Vincent, 1998; Vincent e Zhang, 2001).

Nel nostro caso il metodo di Vincent è stato utilizzato a supporto dei risultati forniti dal t-Test e dall’F-test, quale ulteriore verifica dell’omogeneità delle serie annuali.

Sulla base dei risultati dei tre test, è stato individuato un primo set di serie considerate omogenee, costituito dalle serie che risultano prive di *breakpoint* per almeno due test su tre.

Al fine di garantire un numero di stazioni sufficientemente ampio per l’analisi dei trend sul territorio italiano, il set di serie omogenee è stato esteso alle serie omogenee “con riserva”, così selezionate:

- serie candidate per le quali non è stato possibile costruire una corrispettiva serie di riferimento, ma omogenee per l’F-test (spesso localizzate in una zona non coperta da altre stazioni);
- serie che risultano omogenee solo per il t-test. Queste serie, pur risultando disomogenee per 2 test su 3, non sono state scartate a priori. I risultati del t-test infatti sono stati tenuti in maggiore considerazione, poiché frutto del confronto fra serie candidata e serie di riferimento, approccio più affidabile da un punto di vista climatico. Per lo stesso motivo, l’omogeneizzazione delle serie annuali di temperatura per la stima delle tendenze era stata effettuata proprio in base alle correzioni proposte dal t-test (Desiato et al., 2012).

Una sintesi della verifica dell’omogeneità per tutte le serie di temperatura minima e massima annuale esaminate è riportata nella tabella 2.1; la distribuzione delle stazioni sul territorio è mostrata nelle figure 2.1 e 2.2, rispettivamente per la temperatura minima e la temperatura massima.

Nome	Codice rete *	TMIN	TMAX
TODI	5	X	●
MONGIANA	5	○	●
TARANTO	6	X	X
TERNI	6	●	X
FORLÌ	6	●	●
PARMA	6	●	X
PIACENZA	6	X	●
ALASSIO	6	X	X
IMPERIA	6	●	●
SALÒ	6	●	●
D'EJOLA	6	X	X
CATANZARO	31	●	○
CITTANOVA	31	○	○
CARESER (DIGA)	32	X	●
PIAN FEDAIA (DIGA)	32	●	X
PASSO ROLLE	32	-	X
S. VALENTINO ALLA MUTA	11	X	X
PASSO ROLLE	11	●	●
PAGANELLA	11	●	X
DOBBIACO	11	X	○
AVIANO	11	●	X
TARVISIO	11	X	●
TORINO/CASELLE	11	X	○
TORINO/BRIC DELLA CROCE	11	○	●
NOVARA/CAMERI	11	●	●
MILANO/MALPENSA	11	○	●
BERGAMO/ORIO AL SER	11	●	●
MILANO/LINATE	11	○	○
PIACENZA	11	●	●
BRESCIA/GHEDI	11	X	●
VERONA/VILLAFRANCA	11	●	●
VICENZA	11	●	●
TREVISO/ISTRANA	11	○	●
TREVISO/S. ANGELO	11	●	●
VENEZIA/TESSERA	11	●	●
TRIESTE	11	●	○
ALBENGA	11	X	X
PASSO DELLA CISA	11	-	-
MONTE CIMONE	11	○	●
BOLOGNA/BORGO PANIGALE	11	●	○
PUNTA MARINA	11	●	○
RIMINI	11	●	●
CAPO MELE	11	●	○
PISA/S. GIUSTO	11	●	●
MONTE ARGENTARIO	11	●	●
FIRENZE/PERETOLA	11	○	X
AREZZO	11	●	●
FRONTONE	11	X	X
FALCONARA	11	○	-
GROSSETO	11	X	X

Nome	Codice rete *	TMIN	TMAX
MONTE TERMINILLO	11	○	○
VIGNA DI VALLE	11	●	x
PESCARA	11	●	●
TERMOLI	11	x	x
GUIDONIA	11	○	○
ROMA/URBE	11	●	●
ROMA/CIAMPINO	11	●	x
ROMA FIUMICINO	11	●	x
LATINA	11	●	x
FROSINONE	11	●	●
PRATICA DI MARE	11	x	●
CAMPOBASSO	11	●	●
GRAZZANISE	11	x	●
MONTE S. ANGELO	11	x	○
AMENDOLA	11	●	●
TREVICO	11	x	○
BARI/PALESE MACCHIE	11	○	●
PONZA	11	x	x
NAPOLI/CAPODICHINO	11	x	●
CAPO PALINURO	11	●	●
GIOIA DEL COLLE	11	●	●
LATRONICO	11	●	●
BRINDISI	11	●	x
GROTTAGLIE	11	x	●
MARINA DI GINOSA	11	●	●
LECCE	11	x	x
BONIFATI	11	●	●
MONTE SCURO	11	x	○
CROTONE	11	x	x
S. MARIA DI LEUCA	11	●	●
USTICA	11	x	x
PALERMO/PUNTA RAISI	11	○	○
MESSINA	11	x	○
TRAPANI/BIRGI	11	●	●
PRIZZI	11	x	●
GELA	11	●	●
CATANIA/SIGONELLA	11	●	x
CATANIA/FONTANAROSSA	11	●	●
PANTELLERIA	11	x	●
COZZO SPADARO	11	x	●
LAMPEDUSA	11	○	●
ALGHERO	11	x	●
DECIMOMANNU	11	●	●
CAPO BELLAVISTA	11	x	○
CAGLIARI/ELMAS	11	●	●

* 11 – Rete sinottica del Servizio Meteorologico dell’Aeronautica Militare e dell’Ente Nazionale di Assistenza al Volo; 4, 5, 6 – Rete del CRA-CMA (ex UCEA); da 20 in poi – Reti regionali.

Tabella 2.1 - Risultati della verifica di omogeneità per ogni stazione: “●” omogenea, “○” omogenea “con riserva”, “x” disomogenea, “-” non disponibile.



Figura 2.1 - Localizzazione delle stazioni (61) di temperatura minima annuale, serie omogenee.



Figura 2.2 - Localizzazione delle stazioni (68) di temperatura massima annuale, serie omogenee.

2.3 Selezione delle serie giornaliere

A partire dai tre insiemi delle serie annuali di temperatura minima e massima e di precipitazione cumulata così selezionate, sono state individuate le stazioni che dispongono di dati giornalieri per l'analisi degli estremi climatici.

Poiché gli indici di estremi sono molto sensibili ai dati mancanti, sulle serie giornaliere è necessario applicare criteri di validità più stringenti rispetto a quelli adottati per le serie annuali. I criteri adottati sono quelli implementati nel programma RClimdex (http://www.climdex.org/climdex_software.html), utilizzato per il calcolo degli indici estremi (cap.3.2). In particolare vengono invalidati:

- 1) i mesi con più di 3 giorni mancanti
- 2) gli anni con più di 15 giorni mancanti o con un mese non valido

La selezione delle serie temporali è stata effettuata sui file generati da RClimdex, che fornisce in output le serie di indici di estremi, applicando i seguenti criteri:

Temperatura massima e minima

- 1) non più di 4 anni consecutivi mancanti all'interno della serie (ad eccezione delle serie in cui gli anni mancanti si presentano all'inizio della serie; in questo caso sono stati accettati fino a sei anni mancanti consecutivi);
- 2) presenza di almeno un anno degli ultimi 3 della serie;
- 3) non più di 10 anni mancanti su tutto il periodo 1961-2012;

Precipitazione

- 1) non più di 4 anni consecutivi mancanti all'interno della serie;
- 2) presenza di almeno un anno degli ultimi 3 della serie;
- 3) non più di 7 anni mancanti su tutto il periodo 1961-2012.

Per la temperatura sono stati adottati criteri di selezione meno rigidi, poiché le serie presentano un maggior numero di dati mancanti; viene comunque richiesta la presenza dell'80% di dati validi, come in altri studi sugli estremi climatici (Frich et al., 2002; Klein Tank e Können, 2003; Alexander et al., 2006).

Infine, per garantire una distribuzione uniforme delle stazioni sul territorio italiano, per ciascun parametro è stata effettuata un'ulteriore selezione, scartando, in gruppi di stazioni molto vicine tra di loro, le serie omogenee "con riserva" o quelle con un maggior numero di dati mancanti.

Nelle mappe delle figure 2.3, 2.4, 2.5, sono mostrate le stazioni individuate rispettivamente per la temperatura minima (35 stazioni), per la temperatura massima (42 stazioni) e per la precipitazione cumulata (41 stazioni).



Figura 2.3 - Stazioni selezionate (35) per il calcolo degli indici estremi di temperatura minima.



Figura 2.4 - Stazioni selezionate (42) per il calcolo degli indici estremi di temperatura massima.



Figura 2.5 - Stazioni selezionate (41) per il calcolo degli indici estremi di precipitazione.

3. INDICI DEGLI ESTREMI CLIMATICI

3.1 Gli indici degli estremi climatici definiti dall'ETCCDI

L'Expert Team on Climate Change Detection and Indices (ETCCDI) del "CCL/CLIVAR Working Group on Climate Change Detection" ha definito un insieme di 27 indici, idonei a descrivere gli estremi di temperatura e precipitazione in termini di frequenza, intensità e durata (Peterson et al., 2001, Toreti e Desiato, 2008). L'obiettivo è quello di definire una metodologia comune per la valutazione delle variazioni degli estremi climatici e di rendere confrontabili i risultati ottenuti in diverse parti del mondo.

Per il calcolo degli indici estremi è stato utilizzato il software RCLimindex, basato sull'elaborazione di dati giornalieri di temperatura massima, temperatura minima e precipitazione (http://www.climdex.org/climdex_software.html). Nelle tabelle 3.1 e 3.2 sono riportati tutti gli indici raccomandati dall'ETCCDI: 16 si riferiscono alla temperatura (tab.3.1), 11 alla precipitazione (tab.3.2).

Gli indici in tabella si possono dividere in diverse categorie (Alexander et al., 2006; Klein Tank et al., 2009):

Indici definiti da un valore di soglia fisso

Rientrano in questa categoria i seguenti indici annuali di temperatura: il numero di giorni con gelo (FD0), il numero di giorni senza disgelo (ID0), il numero di giorni estivi (SU25) e il numero di notti tropicali (TR20).

Per la precipitazione gli indici definiti da un valore di soglia fisso sono il numero di giorni con precipitazione intensa nell'anno (R10), il numero di giorni con precipitazione molto intensa (R20) e il numero di giorni superiori ad un valore nn fissato dall'operatore (Rnn).

Questi indici sono rappresentativi solo nelle aree climatiche in cui ha senso l'uso di determinati valori soglia (l'indice ID0 ad esempio, che rappresenta il numero di giorni con temperatura massima minore di 0°C, non è applicabile nelle regioni più calde, per esempio ai tropici).

Gli indici assoluti sono di particolare rilievo poiché una loro variazione può avere un impatto significativo sulla società e sull'ambiente naturale.

Indici assoluti

Gli indici assoluti rappresentano il più alto e il più basso valore registrato nel corso di un mese o di un anno. Per la temperatura sono indici assoluti il valore massimo delle temperature massime giornaliere (TXx), il valore minimo delle temperature massime giornaliere (TXn), il valore massimo delle temperature minime giornaliere (TNx) e il valore minimo delle temperature minime giornaliere (TNn); per la precipitazione, il valore massimo di precipitazione giornaliera (RX1day) e il valore massimo di precipitazione cumulata su 5 giorni (RX5day).

Indici basati sui percentili

Gli indici basati sui percentili permettono di valutare l'evoluzione degli estremi climatici moderati, ovvero quegli estremi con un tempo di ritorno generalmente inferiore a un anno (Klein Tank e Können, 2003).

A differenza degli indici basati su un valore soglia prefissato, quelli basati sui percentili contengono le eccedenze rispetto a valori soglia definiti in termini di frequenza (spesso il 10%), calcolati sulla distribuzione degli eventi nel periodo climatologico di riferimento. Poiché i valori soglia utilizzati per il calcolo delle eccedenze sono specifici della serie climatica in esame, gli indici basati sui percentili sono rappresentativi del clima locale e permettono inoltre di confrontare risultati ottenuti in regioni diverse.

Rientrano in questa categoria le notti fredde (TN10P), le notti calde (TN90P), i giorni freddi (TX10P) e i giorni caldi (TX90P), cioè la percentuale di giorni dell'anno inferiori alla soglia del 10° percentile (TN10P e TX10P) o superiori al 90° percentile (TN90P e TX90P). Per tenere conto del ciclo annuale della temperatura e assicurare quindi che agli eventi estremi sia associata la stessa probabilità di verificarsi nel corso dell'anno, il programma RCLimindex definisce i valori soglia (10° e 90° percentile) per ciascuno dei 365 giorni dell'anno. I percentili sono calcolati sulla base della distribuzione dei dati nel periodo climatologico 1961-1990, definita tramite una finestra di 5 giorni centrata sul giorno in esame (Zhang e Yang, 2004), cioè su un campione di 150 dati (5 giorni per 30 anni).

Gli indici di precipitazione basati sui percentili sono la precipitazione nei giorni molto piovosi (R95p) e la precipitazione nei giorni estremamente piovosi (R99p). Gli indici R95p e R99p sono espressi in millimetri di

pioggia e rappresentano la somma nell'anno delle precipitazioni giornaliere superiori rispettivamente al valore soglia del 95° e del 99° percentile. In questo caso i percentili sono calcolati rispetto alla distribuzione climatologica 1961-1990 delle precipitazioni giornaliere nei giorni piovosi.

Indici di durata

Gli indici di durata identificano periodi prolungati e intensi di caldo (WSDI) o di freddo (CSDI), periodi di giorni consecutivi di pioggia (CWD) o di siccità (CDD) e periodi miti, dai quali dipende la durata della stagione vegetativa (GSL).

L'indice WSDI (CSDI) rappresenta la durata delle onde di calore (di gelo) e si definisce come il numero di giorni nell'anno che fanno parte di un "periodo caldo" ("periodo freddo"), definito come una sequenza di almeno sei giorni consecutivi in cui la temperatura massima (minima) giornaliera è superiore al 90° percentile (inferiore al 10° percentile) della distribuzione 1961-1990. Anche in questo caso, i valori dei percentili sono calcolati su una finestra di 5 giorni centrata su ogni giorno dell'anno. L'utilizzo di valori soglia definiti dai percentili rende gli indici di durata della temperatura rappresentativi delle variazioni del clima locale.

Gli indici CWD e CCD individuano rispettivamente il più lungo periodo di giorni di pioggia o di giorni di siccità nel corso dell'anno.

L'indice GSL, che rappresenta la durata della stagione vegetativa, risulta generalmente significativo solo nell'emisfero nord, nelle zone extratropicali (Alexander, 2006).

Per tutti gli indici di durata, i periodi che iniziano alla fine di un anno e terminano all'inizio dell'anno successivo, vengono conteggiati nell'anno successivo.

Altri indici

Alcuni indici non rientrano in nessuna delle categorie precedenti, ma permettono di avere un quadro completo dell'evoluzione degli estremi di temperatura e precipitazione. Questi sono l'indice annuale di precipitazione totale (PRCPTOT), l'escursione termica giornaliera (DTR) e l'indice di intensità di pioggia (SDII).

INDICI DI TEMPERATURA

ID	Nome dell'indice	Definizione	Unità di misura
FD0	Giorni con gelo	Numero di giorni nell'anno con temperatura minima < 0 °C	Giorni
SU25	Giorni estivi	Numero di giorni nell'anno con temperatura massima > 25 °C	Giorni
ID0	Giorni senza disgelo	Numero di giorni nell'anno con temperatura massima < 0 °C	Giorni
TR20	Notti tropicali	Numero di giorni nell'anno con temperatura minima > 20 °C	Giorni
GSL	Durata della stagione vegetativa	Numero di giorni nell'anno (dal 1 Gennaio al 31 Dicembre nell'emisfero Nord, dal 1 Luglio al 30 Giugno nell'emisfero Sud) compresi fra il primo periodo di almeno 6 giorni con temperatura media > 5 °C e il primo periodo di almeno 6 giorni dopo il 1 Luglio (1 Gennaio nell'emisfero Sud) con temperatura media < 5 °C	Giorni
TXx	Massimo delle temperature massime	Valore massimo mensile delle temperature massime giornaliere	°C
TNx	Massimo delle temperature minime	Valore massimo mensile delle temperature minime giornaliere	°C
TXn	Minimo delle temperature massime	Valore minimo mensile delle temperature massime giornaliere	°C
TNn	Minimo delle temperature minime	Valore minimo mensile delle temperature minime giornaliere	°C
TN10p	Notti fredde	Percentuale di giorni in cui la temperatura minima giornaliera è inferiore al 10° percentile	%
TX10p	Giorni freddi	Percentuale di giorni in cui la temperatura massima giornaliera è inferiore al 10° percentile	%
TN90p	Notti calde	Percentuale di giorni in cui la temperatura minima giornaliera è superiore al 90° percentile	%
TX90p	Giorni caldi	Percentuale di giorni in cui la temperatura massima giornaliera è superiore al 90° percentile	%
WSDI	Indice di durata dei periodi di caldo	Numero di giorni nell'anno in cui la temperatura massima è superiore al 90° percentile per almeno 6 giorni consecutivi	Giorni
CSDI	Indice di durata dei periodi di freddo	Numero di giorni nell'anno in cui la temperatura minima è inferiore al 10° percentile per almeno 6 giorni consecutivi	Giorni
DTR	Escursione termica giornaliera	Differenza media mensile fra temperatura massima e temperatura minima giornaliera	°C

Tabella 3.1 - *Indici estremi di temperatura definiti dall'ETCCDI.*

INDICI DI PRECIPITAZIONE			
ID	Nome dell'indice	Definizione	Unità di misura
RX1day	Massima precipitazione in 1-giorno	Valore massimo mensile di precipitazione in 1 giorno	mm
Rx5day	Massima precipitazione in 5-giorni	Valore massimo mensile di precipitazione in 5 giorni consecutivi	mm
SDII	Intensità di pioggia giornaliera	Totale annuale di precipitazione diviso per il numero di giorni piovosi nell'anno (definiti come giorni con precipitazione ≥ 1 mm)	mm/giorno
R10	Numero di giorni con precipitazione intensa	Numero di giorni nell'anno con precipitazione ≥ 10 mm	Giorni
R20	Numero di giorni con precipitazione molto intensa	Numero di giorni nell'anno con precipitazione ≥ 20 mm	Giorni
Rnn	Numero di giorni con precipitazione superiore a nn mm	Numero di giorni nell'anno con precipitazione \geq nn mm, dove nn viene definito dall'operatore	Giorni
CDD	Giorni consecutivi senza pioggia	Numero massimo di giorni consecutivi con precipitazione giornaliera < 1 mm	Giorni
CWD	Giorni piovosi consecutivi	Numero massimo di giorni consecutivi con precipitazione giornaliera ≥ 1 mm	Giorni
R95p	Precipitazione nei giorni molto piovosi	Somma nell'anno delle precipitazioni giornaliere superiori al 95° percentile	mm
R99p	Precipitazione nei giorni estremamente piovosi	Somma nell'anno delle precipitazioni giornaliere superiori al 99° percentile	mm
PRCPTOT	Totale annuale di precipitazione	Totale annuale di precipitazione nei giorni piovosi (con precipitazione ≥ 1 mm)	mm

Tabella 3.2 – Indici estremi di precipitazione definiti dall'ETCCDI.

3.2 Gli indici degli estremi climatici per l'Italia

Per l'analisi degli estremi climatici sul territorio italiano, fra gli indici raccomandati dall'ETCCDI sono stati individuati 13 indici di temperatura e 6 indici di precipitazione (tab. 3.3 e 3.4), pertinenti e significativi per il nostro clima, che descrivono eventi estremi moderati, con un tempo di ritorno generalmente inferiore a un anno. Quest'ultima condizione assicura che il numero di eventi sia sufficientemente elevato per poter effettuare un'analisi dei trend che abbia significato su una serie temporale di 50 anni (Klein Tank et al., 2006).

Tutti gli indici sono stati calcolati utilizzando il programma Rclimdex, che esegue in una prima fase un controllo sui dati mancanti applicando criteri molto stringenti sulle serie giornaliere di temperatura e precipitazione (par. 2.3). Alcuni indici vengono calcolati su base mensile e annuale, altri solo su base annuale; in questo lavoro sono stati analizzati gli indici estremi annuali.

Con riferimento agli indici basati sui percentili, Rclimdex esegue un ulteriore controllo, richiedendo la presenza di almeno il 70% dei dati nel periodo climatologico 1961-1990 per il calcolo dei valori del 10° e 90° percentile. Per alcune serie di temperatura che non soddisfano questo requisito, gli indici basati sui percentili non sono stati

calcolati.

Per gli indici di temperatura FD0, TR20 e SU25 è stato utilizzato un numero inferiore di serie rispetto all'insieme selezionato. Sono state scartate le stazioni in cui questi indici rappresentano eventi molto rari, assumendo valori quasi sempre nulli (sono state scartate le serie con valore medio dell'indice < 1 nel periodo climatologico 1961-1990).

Nella tabella 3.5 è riportato il numero di stazioni effettivamente utilizzato per il calcolo di ogni indice.

Indici degli estremi di freddo	Indici degli estremi di caldo
Giorni con gelo (FD0)	Giorni estivi (SU25)
Notti tropicali (TR20)	Massimo delle temperature massime (TXx)
Massimo delle temperature minime (TNx)	Minimo delle temperature massime (TXn)
Minimo delle temperature minime (TNn)	Giorni freddi (TX10p)
Notti fredde (TN10p)	Giorni caldi (TX90p)
Notti calde (TN90p)	Indice di durata dei periodi di caldo (WSDI)

Tabella 3.3 - *Indici estremi di temperatura esaminati per l'Italia.*

Estremi di precipitazione
Massima precipitazione in 1-giorno (RX1day)
Massima precipitazione in 5-giorni (Rx5day)
Numero di giorni con precipitazione intensa (R10)
Numero di giorni con precipitazione molto intensa (R20)
Precipitazione nei giorni molto piovosi (R95p)
Indice di intensità di pioggia (SDII)

Tabella 3.4 - *Indici estremi di precipitazione esaminati per l'Italia.*

Indice	Numero di stazioni
FD0	28
TR20	29
TNn	35
TNx	35
TN10P	34
TN90P	34
TXn	42
TXx	42
SU25	39
TX10P	39
TX90P	39
WSDI	39
R10	41
R20	41
R95P	41
SDII	41
RX1	35
RX5	35

Tabella 3.5 - *Numero di stazioni considerate per ogni indice.*

4. METODO DI CALCOLO DEI TREND

4.1 Estremi di temperatura

Le serie annuali degli indici di estremi di temperatura di ciascuna stazione sono state sottoposte ad analisi statistica per rilevare o meno l'esistenza di trend nel periodo 1961-2012. Per ciascun indice, i trend stimati sono stati riportati su una mappa.

Per tutti gli indici è stata poi calcolata un'unica serie temporale rappresentativa dell'Italia. Questa serie è stata ottenuta calcolando dapprima i valori annuali di anomalia (cioè degli scostamenti dalla norma) dell'indice rispetto alla media climatologica 1961-1990 per ciascuna stazione e calcolando poi la media aritmetica delle anomalie di tutte le stazioni anno per anno (Aguilar et al., 2005; Vincent et al., 2011; Desiato et al., 2012). In questo modo si riduce l'errore introdotto dalla possibile mancanza dei valori di un certo numero di stazioni nello stesso anno. Le anomalie infatti, essendo determinate da sistemi e fenomeni a grande scala, sono piuttosto uniformi e pertanto la media nazionale risente poco dei valori mancanti. Un valore di anomalia annuale "media nazionale" è stato considerato valido se calcolato come media delle anomalie di almeno il 70% delle stazioni per gli anni che vanno dal 1965 al 2012 e di almeno il 55% delle stazioni dal 1961 al 1965.

L'analisi dei trend di ogni indice è stata effettuata su due periodi distinti: 1961-2012 e 1981-2012. Ciò al fine di confrontare i trend negli ultimi 50 e 30 anni circa. La scelta del 1981 come anno d'inizio del periodo più recente è anche motivata dal fatto che diversi studi hanno rilevato che il rateo dell'aumento della temperatura a scala globale ed europea ha subito un aumento negli ultimi 30-35 anni (IPCC, 2001, 2007; KleinTank et al., 2002; Jones e Moberg, 2003); in particolare, proprio all'inizio degli anni '80 è stato individuato un *change point* nella serie della temperatura media annuale in Italia (Toreti e Desiato, 2007).

4.2 Estremi di precipitazione

L'analisi degli estremi di precipitazione è stata effettuata con la stessa metodologia utilizzata per gli estremi di temperatura. In tutte le stazioni sono stati calcolati e riportati su mappe i trend delle serie annuali degli indici nel periodo 1961-2011. I risultati indicano in generale una coerenza spaziale molto minore di quella riscontrata negli estremi di temperatura; si rilevano trend positivi in alcune stazioni e negativi in altre, anche a distanze relativamente brevi. La forte variabilità spaziale si può attribuire all'influenza di fattori locali sul regime delle precipitazioni e in particolare sulle precipitazioni intense.

Anche le serie degli indici estremi di precipitazione sono state poi aggregate spazialmente. L'aggregazione spaziale, filtrando la variabilità locale, dovrebbe consentire di individuare un eventuale segnale climatico a scala nazionale. Per gli indici RX1day e RX5day è stata calcolata un'unica serie di anomalie medie rispetto al valore normale 1961-1990, rappresentativa dell'Italia. Per gli indici R10, R20, R95P, SDII, che dispongono di un numero maggiore di serie, sono state calcolate 3 serie di anomalie medie, rappresentative rispettivamente del Nord, del Centro e del Sud e Isole.

Il metodo di calcolo delle serie di anomalie medie e i criteri di validità sono quelli già descritti per la costruzione della serie aggregata degli estremi di temperatura. Tutte le serie sono state poi sottoposte ad analisi statistica per rilevare l'esistenza o meno di trend nel periodo 1961-2012.

4.3 Analisi dei trend e significatività

Viene qui descritta la metodologia utilizzata per l'analisi dei trend, basata su un approccio di tipo non parametrico. Trattando di analisi dei trend, è immediato pensare al modello di regressione lineare semplice. Effettivamente, l'OLS (*ordinary least square*) è il metodo di stima più noto e i suoi campi di applicazione sono i più svariati, climatologia compresa (Klein Tank e Können, 2003). Per una descrizione dettagliata del modello di regressione lineare si rimanda a Wilks (2011); qui di seguito vengono trattati alcuni aspetti del l'OLS che più direttamente hanno a che fare con il nostro studio.

Un'ipotesi importante alla base del modello di regressione lineare è che i dati oggetto di studio siano riconducibili alla distribuzione normale o gaussiana; in questo senso, il modello di regressione lineare rientra nella categoria dei cosiddetti metodi "parametrici". Parte della popolarità dell'OLS si deve alla sua relativa semplicità teorica e al fatto che qualsiasi software per l'analisi dei dati (ad esempio il foglio di calcolo EXCEL)

ne offre una propria implementazione. Tuttavia non si deve dimenticare che la validità dei risultati prodotti dipende dalla conformità dei dati alle ipotesi citate. L'analisi preliminare dei dati, quindi, rappresenta un momento ineludibile del processo di stima dei trend e non può essere sostituita da una procedura informatica completamente automatizzata. In campo climatologico, la precipitazione è un parametro difficilmente riconducibile alla distribuzione gaussiana, che è notoriamente simmetrica. L'analisi dei dati reali suggerisce piuttosto l'utilizzo di distribuzioni asimmetriche, che attribuiscono probabilità via via decrescenti agli eventi intensi ed estremi. D'altro canto, la temperatura è un parametro che meglio si presta a una descrizione in termini di distribuzione normale, ma con approssimazioni più o meno valide a seconda dei casi.

Per quanto riguarda le serie degli indici di estremi di temperatura e precipitazione, una prima analisi a campione delle serie ha messo in evidenza: 1) la loro non conformità alla distribuzione normale; 2) la presenza di autocorrelazione significativa tra i "residui" del modello. Una descrizione dettagliata dell'effetto che l'autocorrelazione gioca nello studio della significatività dei trend è disponibile nel testo di Ostrom (1990).

Un'alternativa al modello di regressione lineare, impiegata spesso nello studio delle tendenze climatiche, è costituita dall'uso combinato dello stimatore di Theil-Sen (Sen, 1968) e del test di Mann-Kendall (Mann, 1945; Kendall, 1976), che forniscono rispettivamente una stima del trend e della sua significatività.

Lo stimatore di Theil-Sen è un metodo di stima dei trend il cui utilizzo in climatologia è ben documentato nella letteratura scientifica (Alexander et al., 2006). Tre sono gli aspetti da mettere in evidenza dello stimatore di Theil-Sen: 1) è un metodo di stima non parametrico, ovvero prescinde da ipotesi specifiche sulla distribuzione dei dati presi in esame; 2) a differenza dell'OLS è uno stimatore "robusto" (ovvero poco sensibile) alla presenza di valori anomali (*outliers*); 3) quando non valgono le condizioni di regolarità dell'OLS, lo stimatore di Theil-Sen è statisticamente più efficiente del modello di regressione lineare. L'ipotesi di base è che il processo oggetto di analisi evolve nel tempo in maniera lineare (crescente o decrescente). La pendenza della retta (*slope*) è fornita dalla mediana dei trend che possono essere calcolati per ciascuna coppia di punti appartenente al set di dati.

Il test dei ranghi di Mann-Kendall, anch'esso un metodo non parametrico, fornisce una misura della significatività del trend. Come per lo stimatore di Theil-Sen, l'utilizzo del test di Mann-Kendall è ben documentato in ambito climatologico e idrologico. Poiché la presenza di autocorrelazione può minare l'abilità del test nell'individuare la significatività, von Storch (1995) suggerisce di utilizzare sulla serie dei dati una tecnica di "*pre-whitening*" prima dell'applicazione del test di Mann-Kendall. Il termine "*pre-whitening*" indica che la serie autocorrelata (*red noise*) viene trasformata in una serie i cui termini sono scorrelati (*white noise*).

In questo lavoro l'analisi dei trend è stata effettuata mediante il software statistico R. Il test di Mann-Kendall è implementato nel pacchetto "Kendall"; un'implementazione dello stimatore di Theil-Sen e del processo di *pre-whitening* secondo lo schema di Zhang (Wang e Swail, 2001) è invece disponibile nel pacchetto "zyp". Una descrizione dettagliata del *pre-whitening* e dei diversi metodi di implementazione sono dati da Yue et al. (2002) e Wang e Swail (2001).

5. RISULTATI

5.1 Indici di temperatura

Le figure 5.1-5.12 mostrano sinteticamente su mappe i trend degli indici sulle stazioni con dati utili nel periodo 1961-2012. La scala di colori utilizzata indica con il rosso una tendenza al riscaldamento, con il blu al raffreddamento. I trend statisticamente significativi (al livello del 5%) sono rappresentati dai cerchi di dimensioni maggiori.

I risultati indicano in generale una tendenza al riscaldamento.

Il numero di giorni con gelo (FD0) è prevalentemente in diminuzione, con variazioni fino a -8 giorni/10 anni a Monte Cimone; su un paio di stazioni della costa adriatica si registra una moderata tendenza all'aumento; le variazioni sono statisticamente significative su meno della metà delle stazioni utili. I giorni estivi (SU25) e le notti tropicali (TR20) sono in aumento praticamente ovunque, con variazioni statisticamente significative nella maggior parte delle stazioni (figg. 5.2-5.3). L'aumento massimo dei giorni estivi è dell'ordine di 10-12 giorni /10 anni, quello delle notti tropicali di 8-9 giorni/10 anni.

Anche i trend degli indici assoluti sono coerenti con un aumento delle temperature. Ciò vale in particolare per i valori massimi annuali della temperatura minima (TN_x, fig. 5.4) e della temperatura massima (TX_x, fig. 5.6), i cui trend positivi sono statisticamente significativi su numerose stazioni. I trend più marcati di entrambi gli indici arrivano a sfiorare variazioni di 1°C/10 anni. Le tendenze sono assai meno pronunciate nei valori minimi annuali della temperatura minima (TN_n, fig. 5.5) e della temperatura massima (TX_n, fig. 5.7), per i quali la maggior parte dei trend non sono statisticamente significativi e sono di segno sia positivo che negativo. Tuttavia, 5 stazioni su 10 di pianura dell'Italia settentrionale mostrano un trend significativo di aumento dei minimi annuali della temperatura massima (TX_n), compreso tra 0.4 e 0.9 °C/10 anni.

Gli indici di temperatura basati sui percentili confermano la tendenza al riscaldamento in maniera più marcata. L'analisi dei trend indica variazioni spazialmente coerenti su tutto il territorio, statisticamente significative in quasi tutte le stazioni esaminate. Come mostrato rispettivamente dalle figure 5.8 e 5.10, si osserva un aumento consistente delle notti calde (TN90P) e delle giornate calde (TX90P). I trend delle notti calde superano in alcune stazioni il 4% / 10 anni (cioè un aumento di circa 14 giorni in 10 anni); i trend dei giorni caldi superano il 6%/10 anni (cioè un aumento di circa 21 giorni in 10 anni). Insieme all'aumento degli indici rappresentativi degli estremi "caldi", si registra una riduzione degli indici rappresentativi degli estremi "freddi", sia pure meno marcata. Le mappe relative alle notti fredde (TN10P, fig. 5.9) e alle giornate fredde (TX10P, fig. 5.11) mettono in evidenza trend negativi in tutte le stazioni, con ampiezze massime dei trend di -2.4 % /10 anni per entrambi gli indici (cioè una diminuzione di circa 8 giorni in 10 anni).

Anche l'indice rappresentativo delle onde di calore (WSDI) mostra trend positivi e statisticamente significativi in numerose stazioni, soprattutto al Nord Italia (fig. 5.12). Il valore più alto si registra nella stazione di Milano Linate con un aumento di circa 11 giorni in 10 anni.

Per tutti gli indici sono state poi analizzate le serie delle anomalie medie "nazionali", (figg. 5.13 – 5.24). Le curve tratteggiate rappresentano uno *smoothing* dei dati effettuato con lo stimatore "loess" (Cleveland, 1979). Sui grafici mancano i valori di due o 3 anni, nei quali i dati disponibili non soddisfano i requisiti minimi per la determinazione dei valori medi di anomalia (v. cap.4.1).

Le serie confermano in generale la tendenza al riscaldamento, con un aumento del valore degli indici che descrivono gli estremi di caldo (SU25, TN90, TX90, WSDI), del numero di notti tropicali (TR20) e dei minimi assoluti della temperatura minima (TN_n) e della temperatura massima (TX_n). I grafici di questi indici (figg. 5.14-5.20, 5.22, 5.24) mostrano in particolare una netta prevalenza di anomalie positive a partire dagli anni '80. Viceversa, il numero di giorni con gelo (FD0), il numero di notti fredde (TN10P) e il numero di giornate fredde (TN10P), mostrano una prevalenza di anomalie negative dall'inizio degli anni '80 ad oggi (figg. 5.13, 5.21, 5.23). Questi risultati confermano per gli estremi di temperatura quanto era stato rilevato per la temperatura media (Toreti e Desiato, 2007), vale a dire un cambiamento dei trend (*change point*) che si colloca all'inizio degli anni '80, periodo in cui ha inizio una fase di riscaldamento più marcato.

Scendendo nel dettaglio, non considerando i dati mancanti del 1988 e del 1999, i giorni con gelo negli ultimi 19 anni sono stati superiori alla media 1961-1990 solo nel 2005 e i 4 anni con numero medio di giorni con gelo più basso dal 1961 si collocano tutti negli ultimi 20 anni (fig. 5.13). I giorni estivi negli ultimi 30 anni sono stati sempre più numerosi della norma 1961-1990, ad eccezione del 1984, 1989, 1995 e 1996. Negli ultimi 10 anni ci sono stati in media circa 19 giorni estivi di più rispetto alla norma 1961-1990, con un picco nel 2003 di +32 giorni (fig. 5.14). Le notti tropicali sono state sempre più numerose della norma 1961-1990 a partire dal 1986, ad

eccezione del 1996, con un picco di anomalia nel 2003 di +45 giorni. L'indice rappresentativo della durata complessiva delle onde di calore (WSDI) ha avuto un aumento abbastanza regolare dai primi anni '80, con un picco nel 2003 seguito dai valori del 2011, 2012 e 2007.

Le serie temporali di anomalie medie di ogni indice sono state poi sottoposte ad analisi dei trend, esaminando separatamente l'intero periodo 1961-2012 e il periodo 1981-2012 (v. cap. 4.1 e 4.3). I risultati sono riportati nella tabella 5.1, dove i trend statisticamente non significativi al livello del 5% sono indicati fra parentesi.

Quasi tutte le serie mostrano trend statisticamente significativi sia nel periodo 1961-2012 che nel periodo 1981-2012. Fanno eccezione le serie del minimo annuale della temperatura minima (TNn) e della temperatura massima (TXn) in entrambi gli intervalli di tempo e la serie del massimo annuale della temperatura massima (TXx) nell'intervallo 1981-2012.

I trend associati agli estremi di caldo risultano in generale più marcati di quelli associati agli estremi di freddo. Questo risultato è in accordo con gli esiti di uno studio relativo al Mediterraneo centro-orientale dal 1958 al 2000 (Kostopoulou e Jones, 2005). I valori dei trend delle notti calde (TN90P) e delle giornate calde (TX90P) sono circa il doppio, rispettivamente, di quelli delle notti fredde (TN10P) e delle giornate fredde (TN90P) nel periodo 1961-2012 e sono circa il triplo nel periodo 1981-2012.

Il confronto fra i trend lineari stimati in modo indipendente nei due intervalli di tempo mostra che per tutti gli indici, ad eccezione del numero di giorni estivi, il rateo di variazione 1981-2012 è maggiore di quello 1961-2012. In particolare, ai *fit* lineari che si ottengono per l'intervallo 1981-2012 corrispondono, negli ultimi 31 anni, una riduzione media in Italia di circa 11 giorni con gelo, un aumento di circa 15 notti tropicali e un aumento di circa 24 giorni caratterizzati da onde di calore.



Figura 5.1 - *Trend 1961-2012 del numero di giorni con gelo (FD0).*



Figura 5.2 - *Trend 1961-2012 del numero di giorni estivi (SU25).*



Figura 5.3 - *Trend 1961-2012 del numero di notti tropicali (TR20).*



Figura 5.4 - *Trend 1961-2012 del massimo annuale della temperatura minima (TNx).*



Figura 5.5 - *Trend 1961-2012 del minimo annuale della temperatura minima (TNn).*



Figura 5.6 - *Trend 1961-2012 del massimo annuale della temperatura massima (TXx).*



Figura 5.7 - *Trend 1961-2012 del minimo annuale della temperatura massima (TXn).*



Figura 5.8 - *Trend 1961-2012 del numero di notti calde (TN90).*



Figura 5.9 - *Trend 1961-2012 del numero di notti fredde (TN10P).*



Figura 5.10 - Trend 1961-2012 del numero di giornate calde (TX90P).



Figura 5.11 - *Trend 1961-2012 del numero di giornate fredde (TX10P).*



Figura 5.12 - *Trend 1961-2012 dell'indice di durata delle onde di calore (WSDI).*

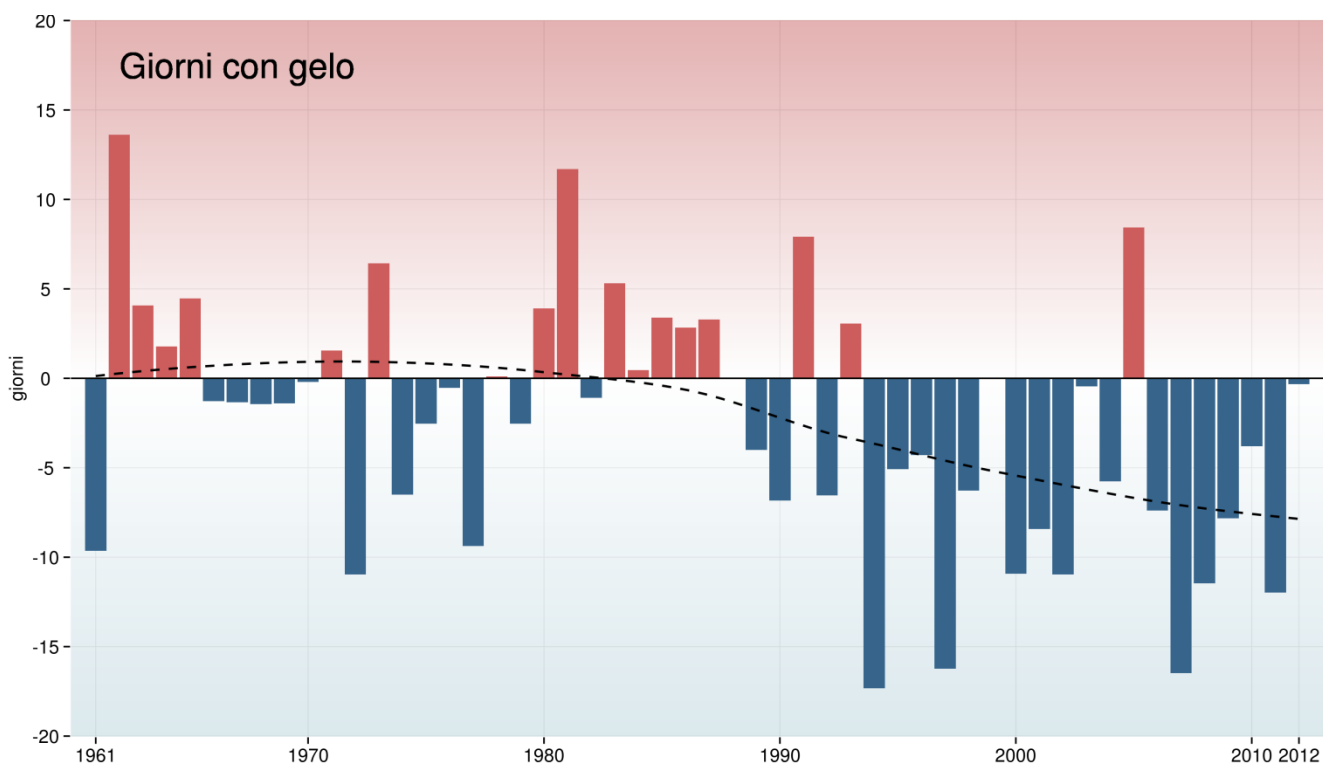


Figura 5.13 - Serie delle anomalie medie annuali in Italia del numero di giorni con gelo, FD0, rispetto al valore normale 1961-1990. Dati mancanti: 1988 e 1999.

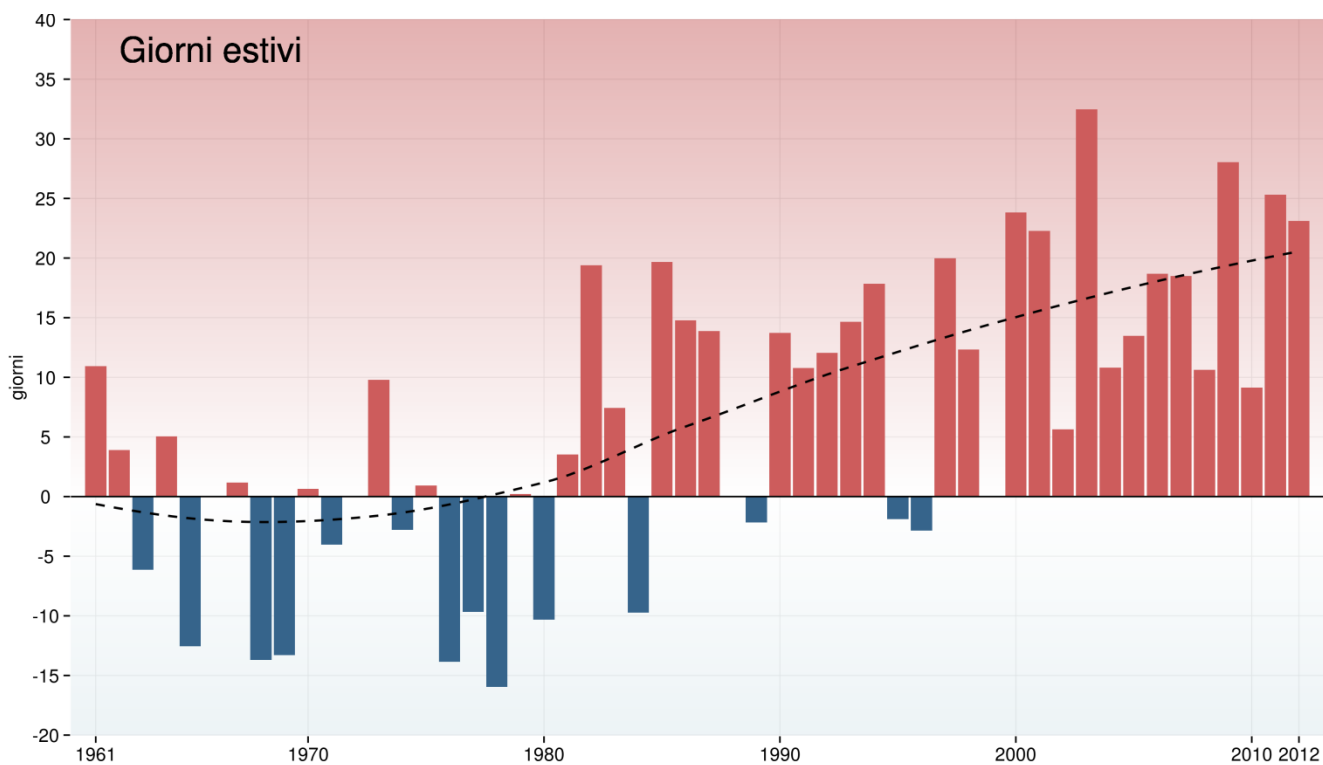


Figura 5.14 - Serie delle anomalie medie annuali in Italia del numero di giorni estivi, SU25, rispetto al valore normale 1961-1990. Dati mancanti: 1972, 1988 e 1999.

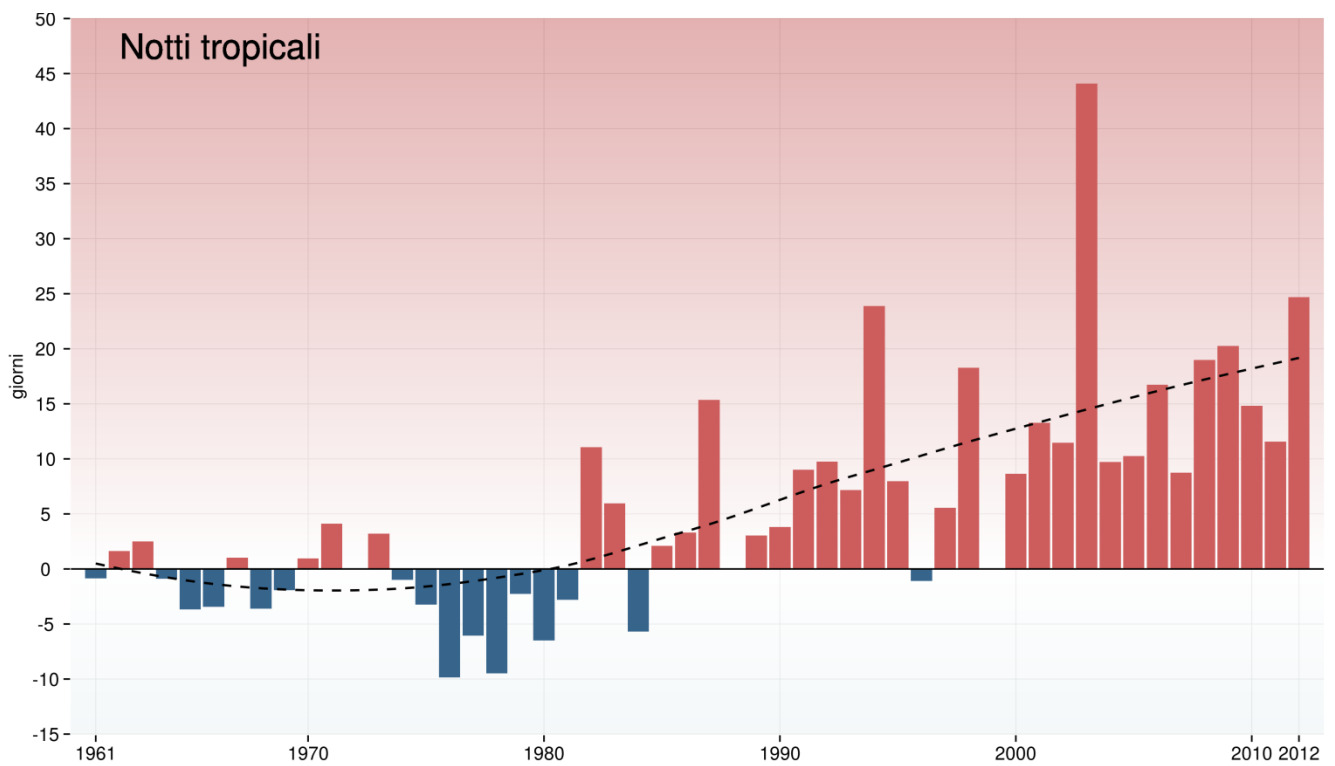


Figura 5.15 - Serie delle anomalie medie annuali in Italia del numero di notti tropicali, TR20, rispetto al valore normale 1961-1990. Dati mancanti: 1972, 1988 e 1999.

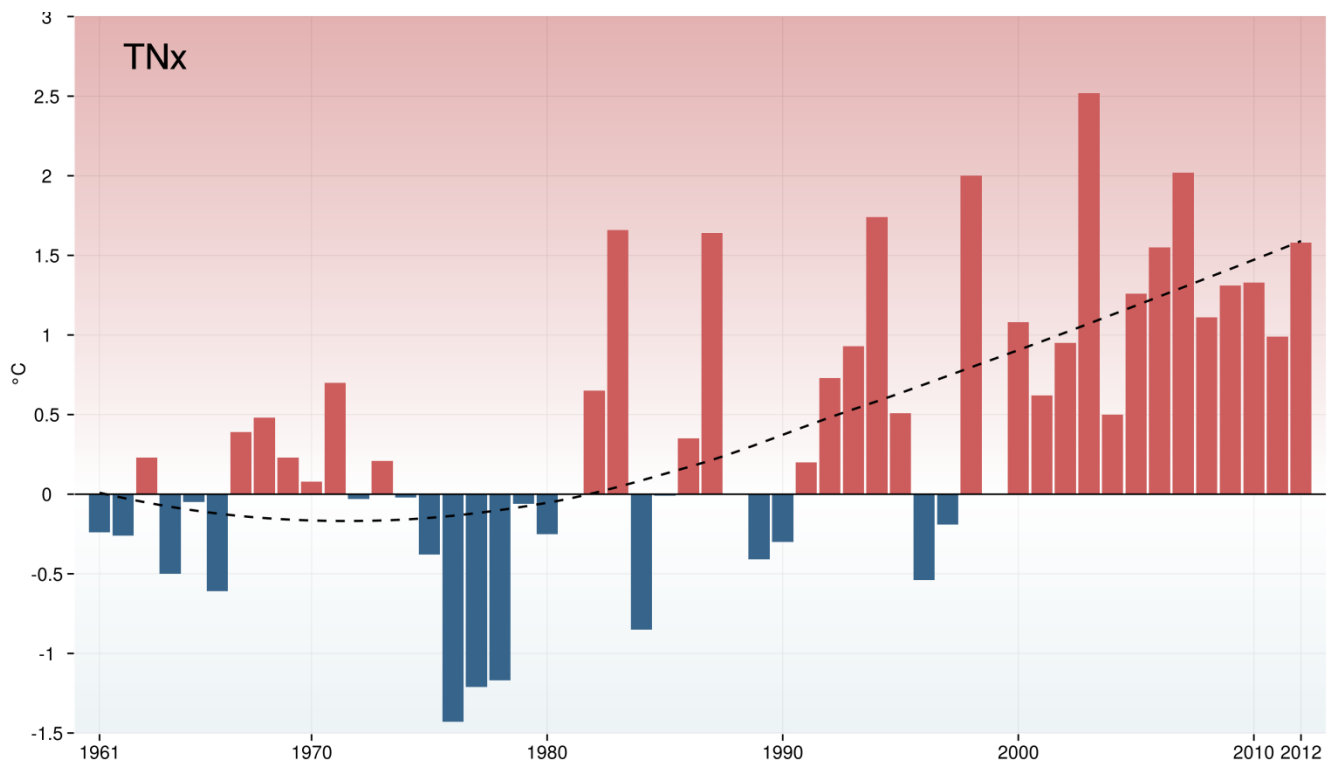


Figura 5.16 - Serie delle anomalie medie annuali in Italia del massimo annuale della temperatura minima, TNx, rispetto al valore normale 1961-1990. Dati mancanti: 1988 e 1999.

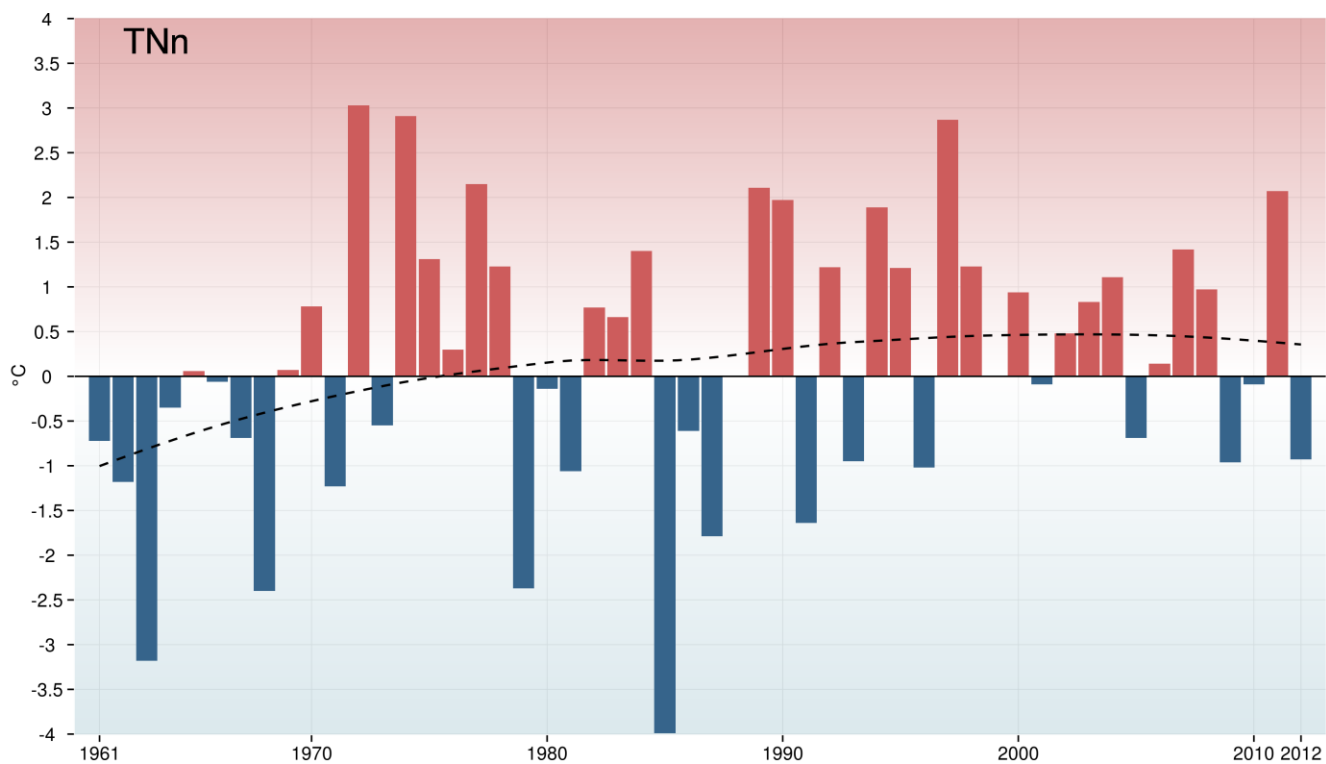


Figura 5.17 - Serie delle anomalie medie annuali in Italia del minimo annuale della temperatura minima, TNn, rispetto al valore normale 1961-1990. Dati mancanti: 1988 e 1999.

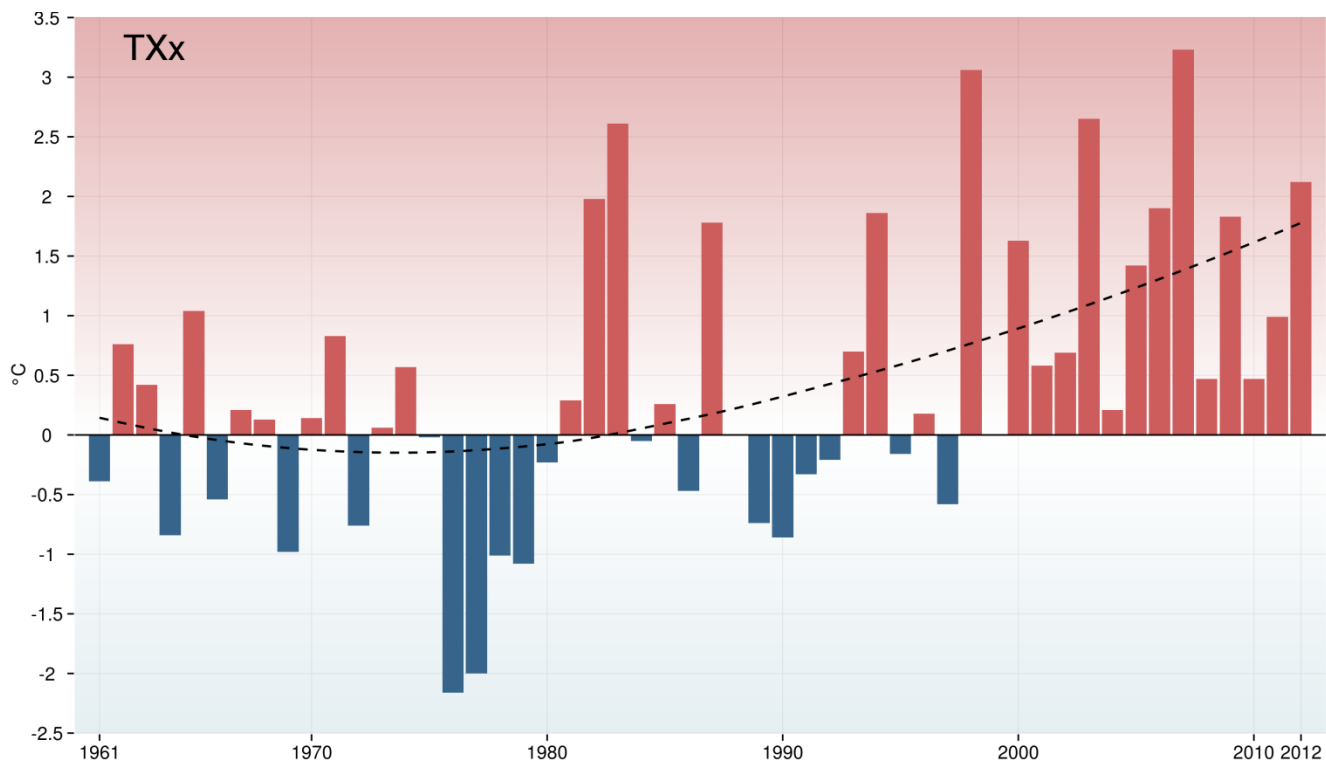


Figura 5.18 - Serie delle anomalie medie annuali in Italia del minimo annuale della temperatura massima, TXx, rispetto al valore normale 1961-1990. Dati mancanti: 1988 e 1999.

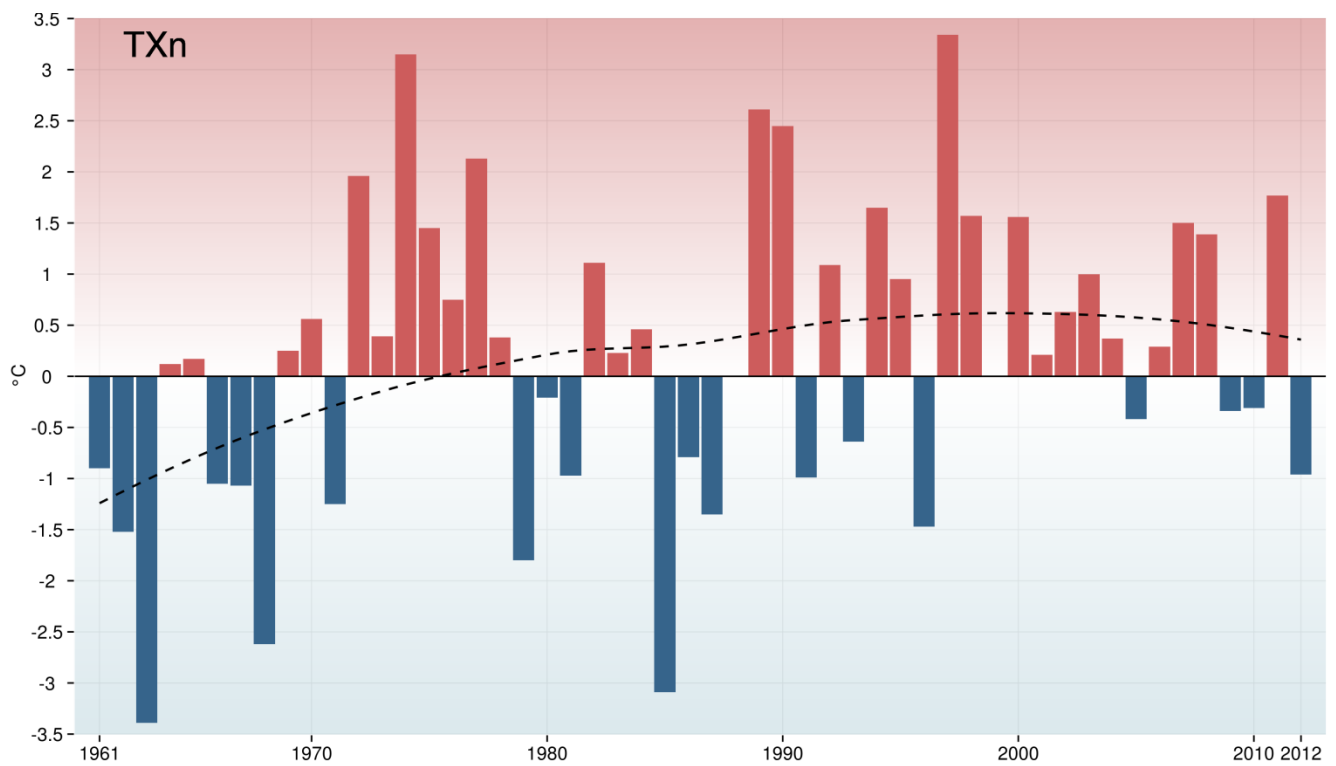


Figura 5.19 - Serie delle anomalie medie annuali in Italia del minimo annuale della temperatura massima, TX_n , rispetto al valore normale 1961-1990. Dati mancanti: 1988 e 1999.

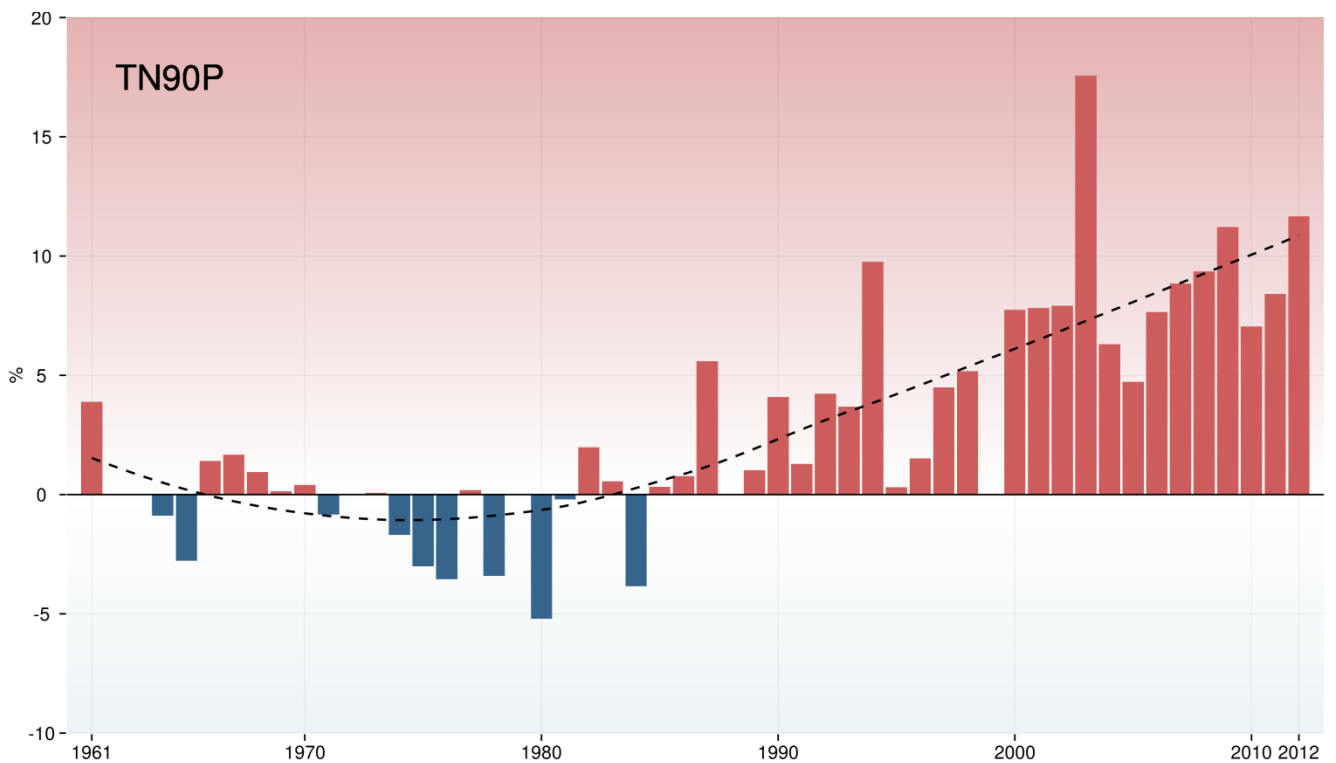


Figura 5.20 - Serie delle anomalie medie annuali in Italia del numero di notti calde, TN_{90P} , rispetto al valore normale 1961-1990. Dati mancanti: 1988 e 1999.

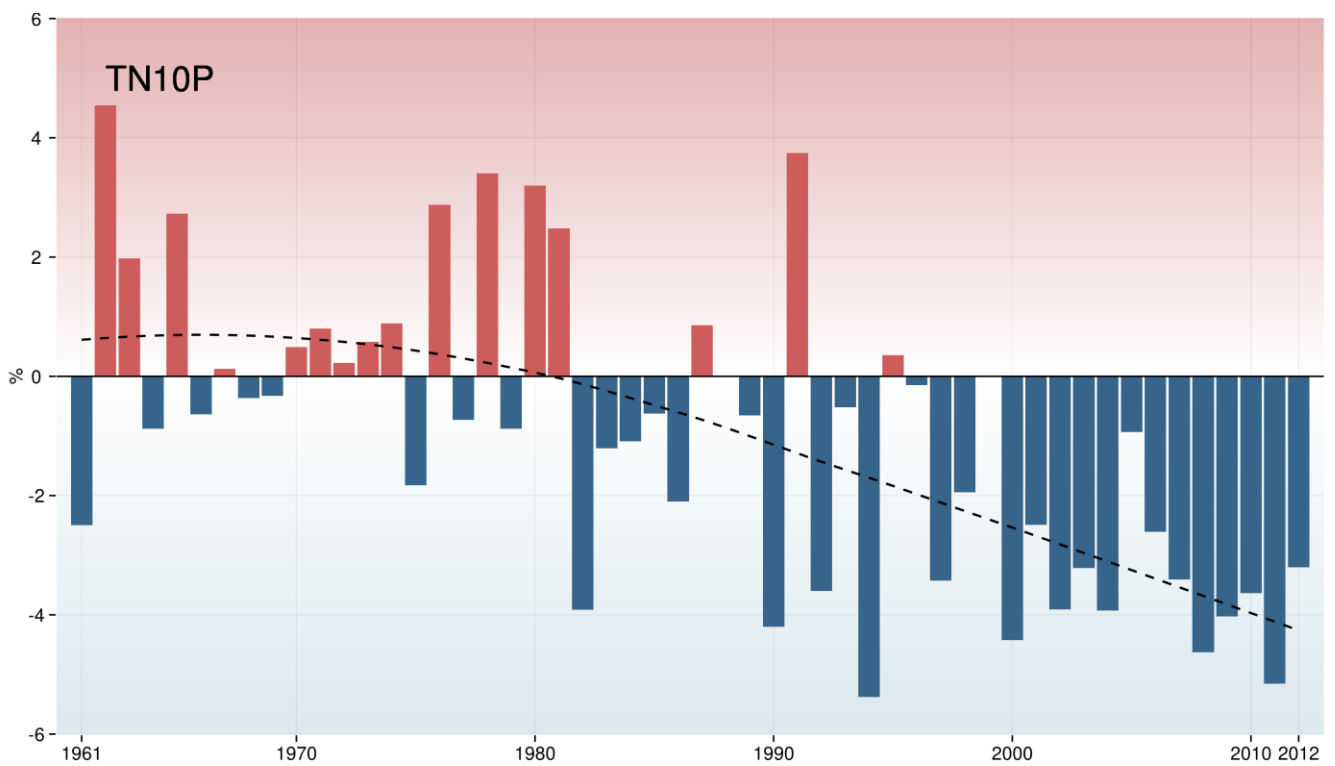


Figura 5.21 - Serie delle anomalie medie annuali in Italia del numero di notti fredde, TN10P, rispetto al valore normale 1961-1990. Dati mancanti: 1988 e 1999.

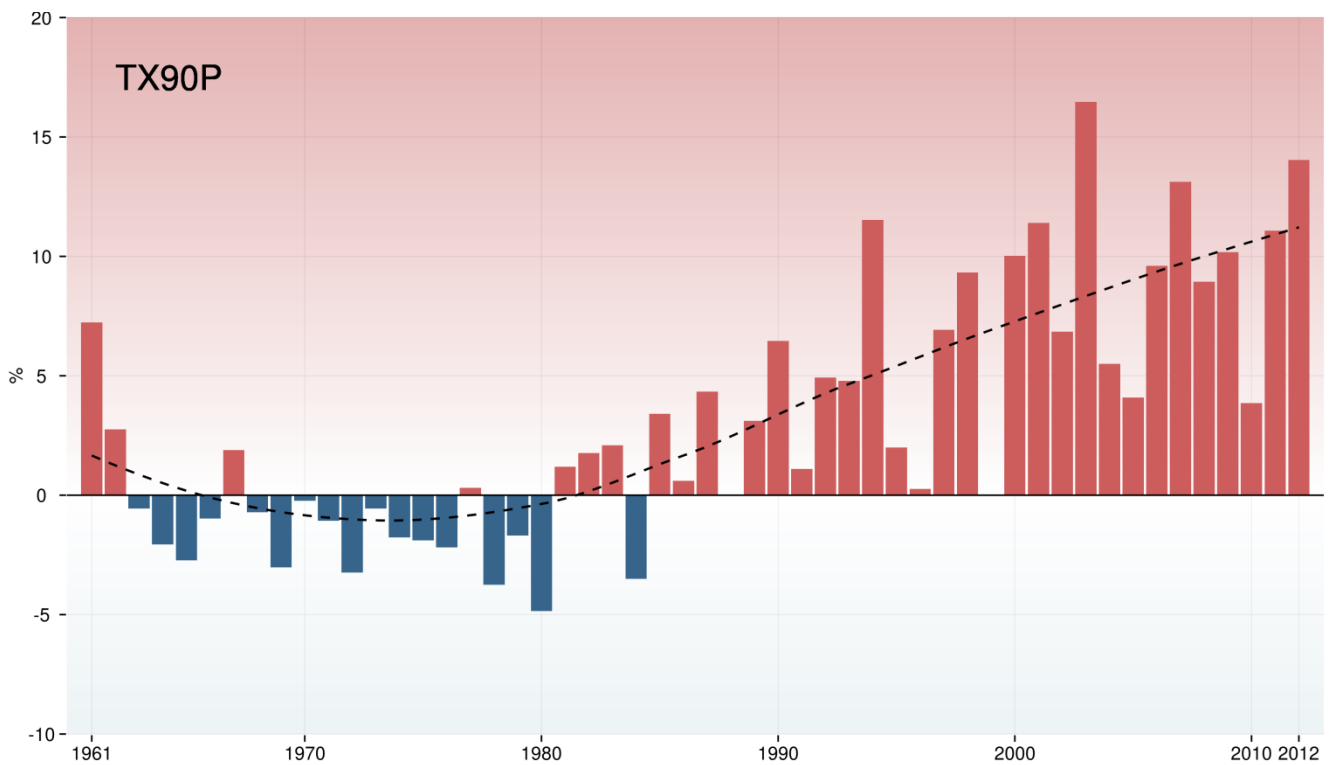


Figura 5.22 - Serie delle anomalie medie annuali in Italia del numero di giornate calde, TX90P, rispetto al valore normale 1961-1990. Dati mancanti: 1988 e 1999.

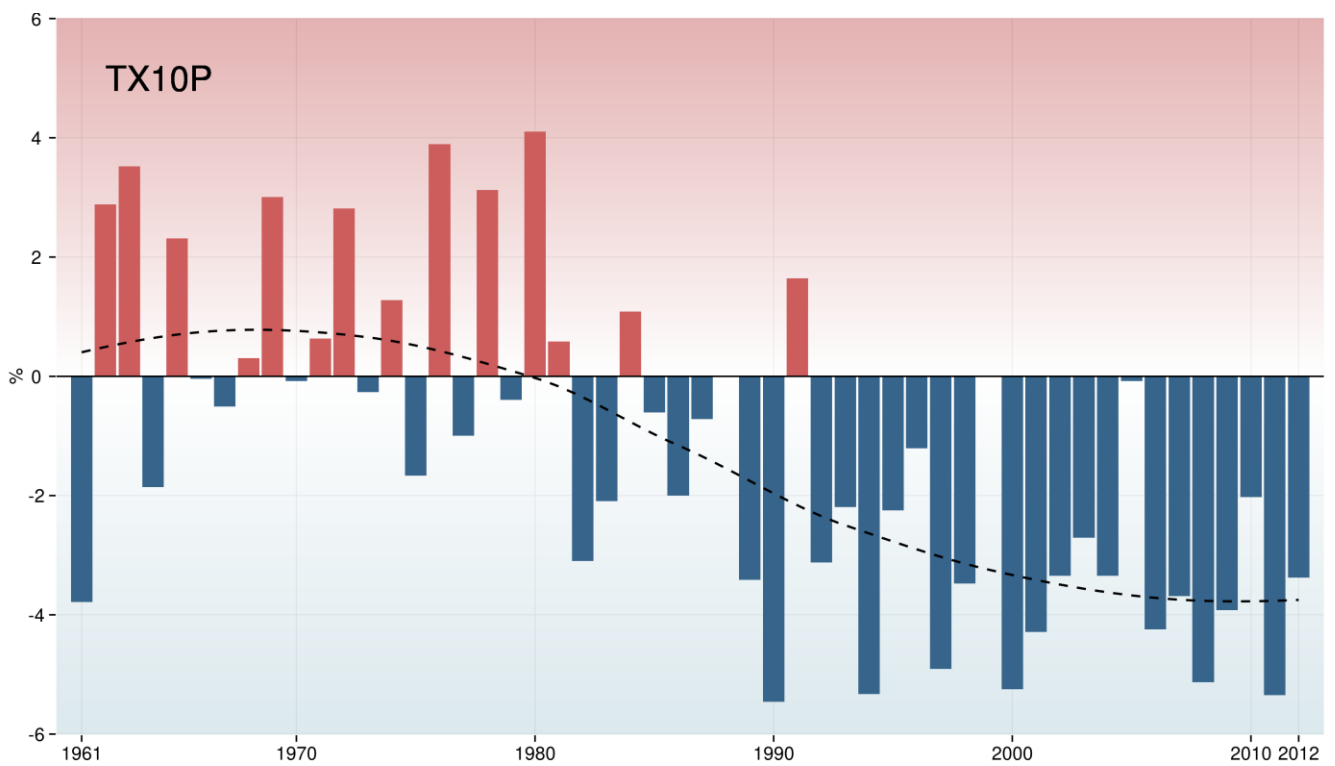


Figura 5.23 - Serie delle anomalie medie annuali in Italia del numero di giornate fredde, TX10P, rispetto al valore normale 1961-1990. Dati mancanti: 1988 e 1999.

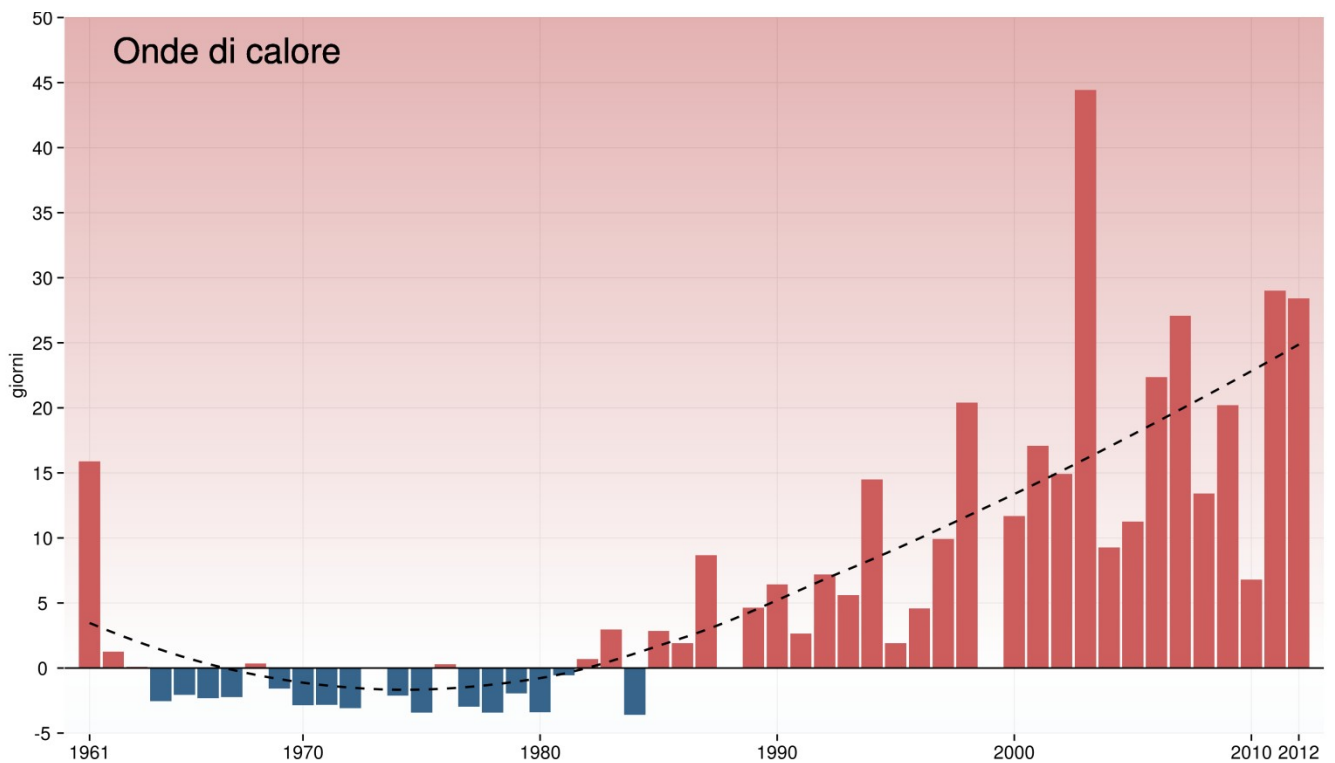


Figura 5.24 - Serie delle anomalie medie annuali in Italia dell'indice di durata delle onde di calore, WSDI, rispetto al valore normale 1961-1990. Dati mancanti: 1988 e 1999.

Indice	Unità di misura del rateo di variazione	Rateo di variazione	
		1961-2012	1981-2012
FD0	Giorni/10 anni	-2.1	-3.5
SU25	Giorni/10 anni	5.7	4.3
TR20	Giorni/10 anni	4.3	5.0
TNx	°C/10 anni	0.3	0.4
TNn	°C/10 anni	(0.2)	(0.06)
TXx	°C/10 anni	0.3	(0.04)
TXn	°C/10 anni	(0.2)	(0.2)
TN90P	%/10 anni	2.3	3.5
TN10P	%/10 anni	-1.1	-1.2
TX90P	%/10 anni	2.8	3.2
TX10P	%/10 anni	-1.2	-0.9
WSDI	Giorni/10 anni	4.5	7.7

Tabella 5.1 – Trend degli indici di estremi di temperatura in Italia, nei periodi 1961-2012 e 1981-2012. Tra parentesi sono indicati i trend statisticamente non significativi.

5.2 Indici di precipitazione

Le figure 5.25 - 5.30 mostrano i trend degli indici di precipitazione sulle stazioni con dati utili nel periodo 1961-2012. La scala di colori utilizzata indica con il blu una tendenza all'aumento delle precipitazioni o a precipitazioni più intense e con il rosso una tendenza alla diminuzione delle precipitazioni o a precipitazioni meno intense. I trend statisticamente significativi (al livello del 5%) sono rappresentati dai cerchi di dimensioni maggiori.

I risultati non indicano tendenze ben definite di aumento o riduzione degli estremi di precipitazione. Rispetto agli indici di temperatura, i trend degli indici di precipitazione hanno una minore coerenza spaziale e mostrano trend più deboli e statisticamente significativi in un numero ridotto di stazioni.

Le figure 5.25-5.26 riportano i trend degli indici assoluti di precipitazione RX1day e RX5day. Entrambe le mappe mostrano deboli tendenze all'aumento delle precipitazioni massime giornaliere in alcune stazioni e alla diminuzione in altre. Solo su due stazioni i trend di RX1day sono statisticamente significativi, uno positivo al Nord e uno negativo al Centro (fig. 5.25); per l'indice RX5day si rileva un numero maggiore di trend statisticamente significativi, con una prevalenza di trend positivi al Sud (fig. 5.26). I valori massimi dei trend sono dell'ordine di 10 mm/10 anni per l'RX1day e di 20 mm/10 anni per l'RX5day.

Per quanto riguarda gli indici definiti da un valore soglia, nelle figure 5.27 e 5.28 sono riportati i trend del numero di giorni con precipitazione intensa (R10) e del numero di giorni con precipitazione molto intensa (R20). L' R10 è in diminuzione su alcune stazioni del Centro e della Calabria, in aumento su alcune stazioni della Sicilia. Una situazione simile si osserva dalla mappa dell'indice R20, che presenta tuttavia solo tre trend statisticamente significativi.

L'indice di precipitazione nei giorni molto piovosi (R95p, fig. 5.29) e l'indice di intensità di pioggia (SDII, fig. 5.30), mostrano andamenti simili, con una prevalenza di trend positivi statisticamente significativi al Nord e al Sud. I valori più pronunciati dei trend si osservano in Sicilia e sono dell'ordine di 50-70 mm/10 anni per l'R95P e di 1-1.5 mm/giorno/10 anni per l'SDII.

Le serie temporali di anomalie medie di ogni indice sono state poi sottoposte ad analisi dei trend, esaminando separatamente l'intero periodo 1961-2012 e il periodo 1981-2012 (v. cap. 4.1 e 4.3). I risultati sono riportati nelle tabelle 5.2 e 5.3, dove i trend statisticamente non significativi al livello del 5% sono indicati fra parentesi.

Le serie di anomalie medie in Italia del valore massimo annuale di precipitazione giornaliera (RX1day) e del valore massimo di precipitazione su 5 giorni (RX5day) sono riportate nelle figg. 5.31 e 5.32. I trend stimati nell'intervallo 1961-2012 (tabella 5.2) risultano in lieve aumento con valori di 1.2 mm/10anni per l'RX1day e di 1.0 mm/10 anni per l'RX5day, ma non statisticamente significativi (al livello del 5%).

Per gli altri indici di precipitazione (R10, R20, R95p, SDII), per i quali si dispone di un numero maggiore di serie utili, sono state calcolate tre serie temporali relative all'Italia settentrionale, centrale e meridionale, effettuando la media delle anomalie delle stazioni su ogni area (figg. 5.33-5.36). Quasi tutti gli indici non mostrano trend statisticamente significativi dal 1961 al 2012 (tab. 5.3). Fanno eccezione: l'R10 al Centro, con un debole trend in diminuzione di -1.2 giorni / 10 anni; l'R95p al Sud e sulle Isole, con un trend in aumento di 12.3 mm / 10 anni; l'SDII al Nord e al Sud e Isole, con un debole trend in aumento di 2.4 mm / giorno ogni 100 anni. Complessivamente, dall'analisi delle serie temporali di questi indici non emergono segnali netti di variazioni significative della frequenza e della intensità delle precipitazioni nell'ultimo mezzo secolo. Va però tenuto presente che questo risultato è stato ottenuto su un insieme abbastanza limitato di stazioni di misura, per le quali è stato possibile determinare con sufficiente accuratezza e completezza le serie degli indici.



Figura 5.25 - *Trend 1961-2012 del valore massimo di precipitazione giornaliera registrato in 1 giorno (RX1day).*



Figura 5.26 - *Trend 1961-2012 del valore massimo di precipitazione giornaliera registrato in 5 giorni (RX5day).*



Figura 5.27 - Trend 1961-2012 del numero di giorni con precipitazione intensa (R10).



Figura 5.28 - *Trend 1961-2012 del numero di giorni con precipitazione molto intensa (R20).*



Figura 5.29 - *Trend 1961-2012 dell'indice di precipitazione nei giorni molto piovosi (R95p).*



Figura 5.30 - *Trend 1961-2012 dell'indice di intensità di pioggia (SDII).*

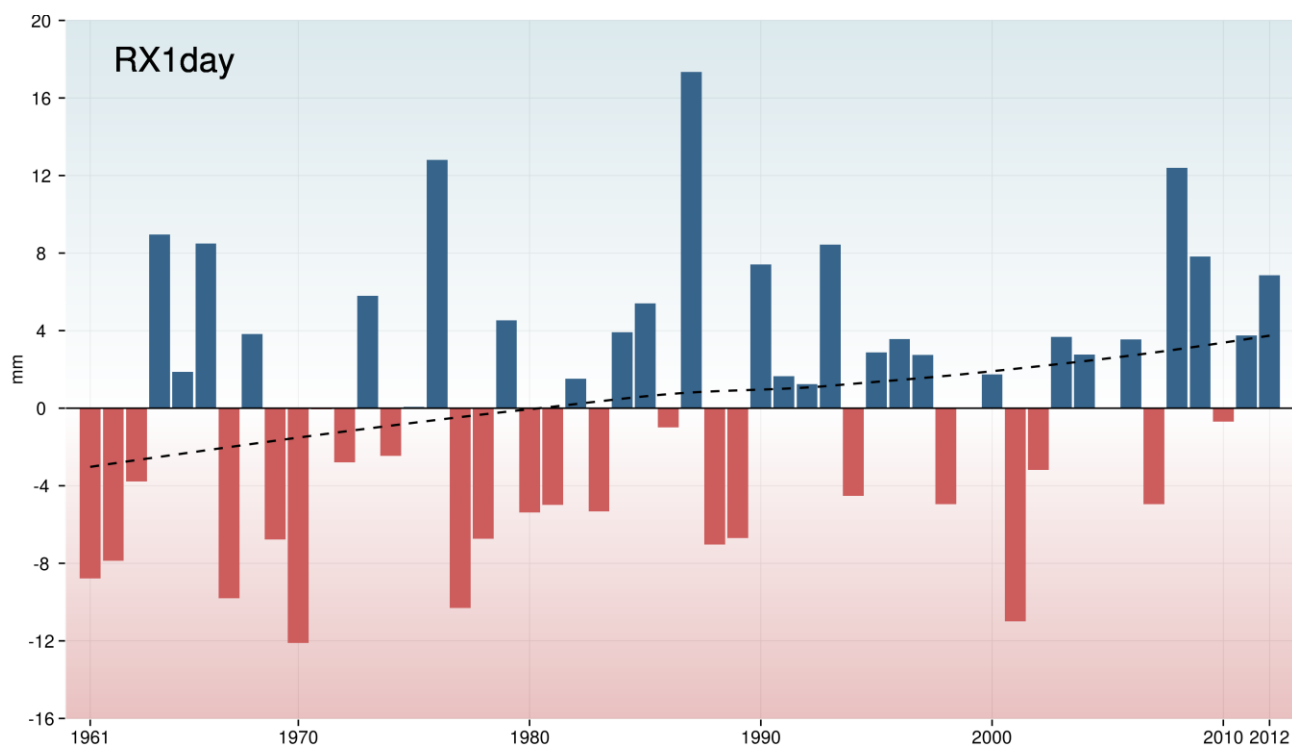


Figura 5.31 - Serie delle anomalie medie annuali in Italia del massimo annuale di precipitazione giornaliera, *RX1day*, rispetto al valore normale 1961-1990. Dati mancanti: 1999 e 2005.

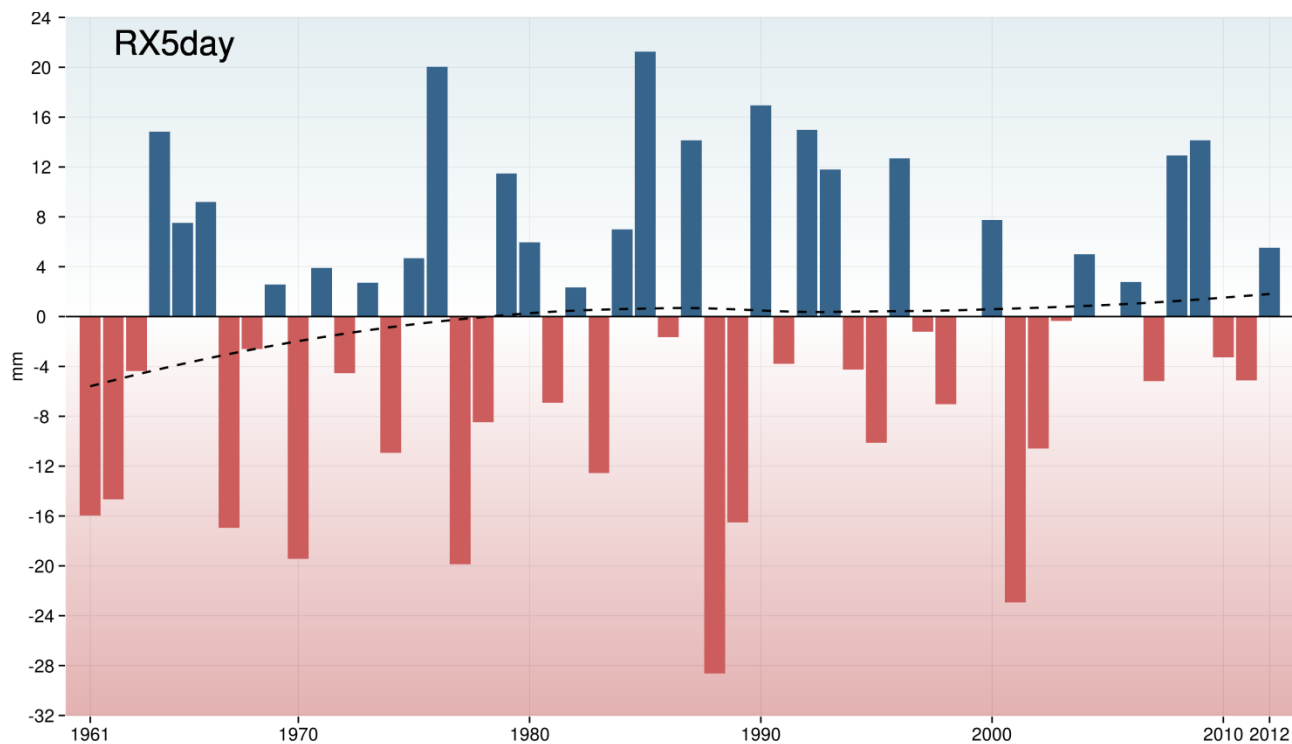


Figura 5.32 - Serie delle anomalie medie annuali in Italia del massimo annuale di precipitazione su 5 giorni, *RX5day*, rispetto al valore normale 1961-1990. Dati mancanti: 1999 e 2005.

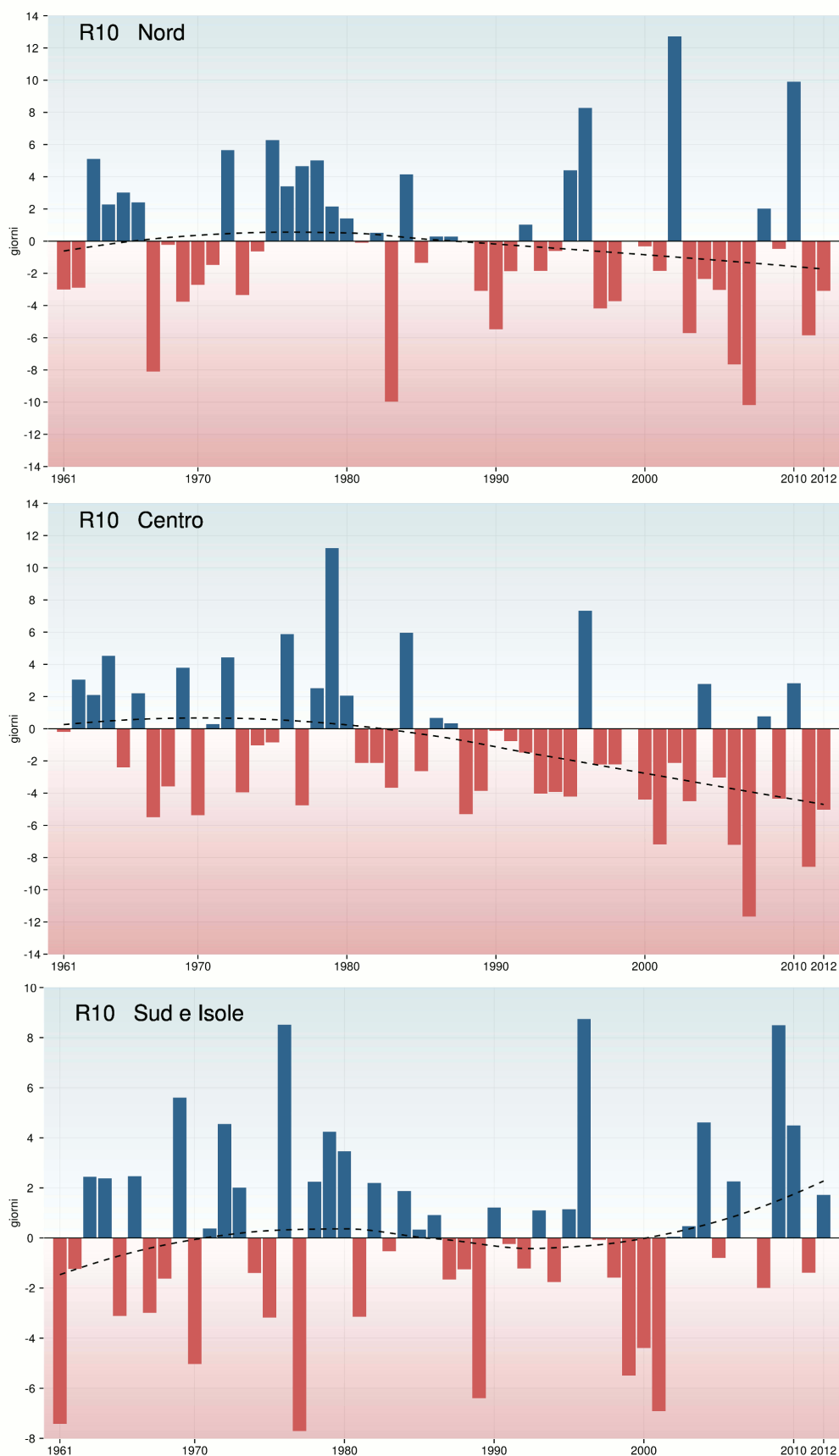


Figura 5.33 - Serie delle anomalie medie annuali del numero di giorni con precipitazione intensa, R10, al Nord, Centro, Sud e Isole, rispetto al valore normale 1961-1990. Dati mancanti: 1988 e 1999, Nord; 1999, Centro; 2007, Sud e Isole.



Figura 5.34 - Serie delle anomalie medie annuali del n. di giorni con precipitazione molto intensa, R20, al Nord, Centro, Sud e Isole, rispetto al valore normale 1961-1990. Dati mancanti: 1988 e 1999, Nord; 1999, Centro; 2007, Sud e Isole.

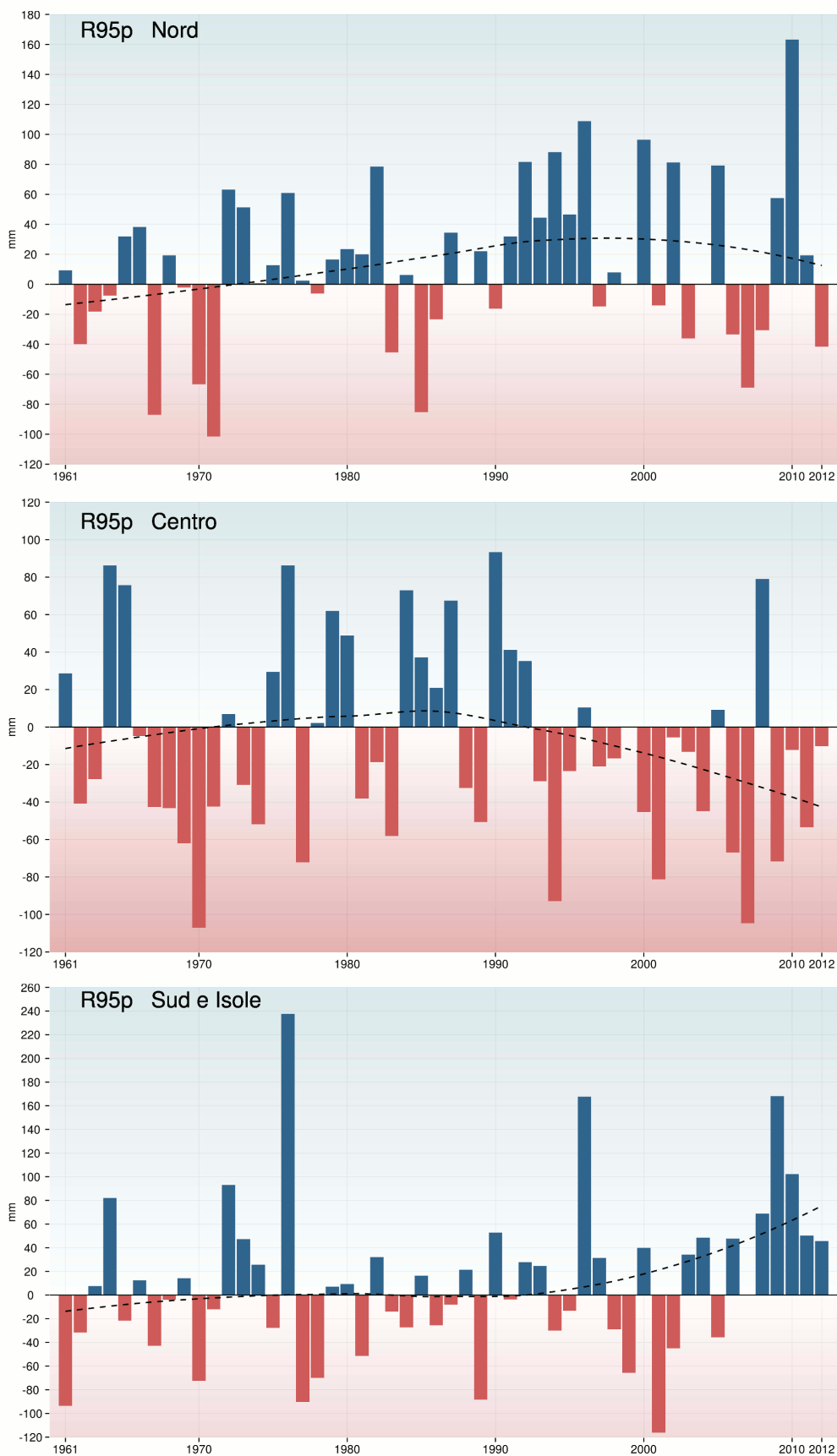


Figura 5.35 - Serie delle anomalie medie annuali del numero di giorni molto piovosi, R95p, al Nord, Centro, Sud e Isole, rispetto al valore normale 1961-1990. Dati mancanti: 1988 e 1999, Nord; 1999, Centro; 2007, Sud e Isole.

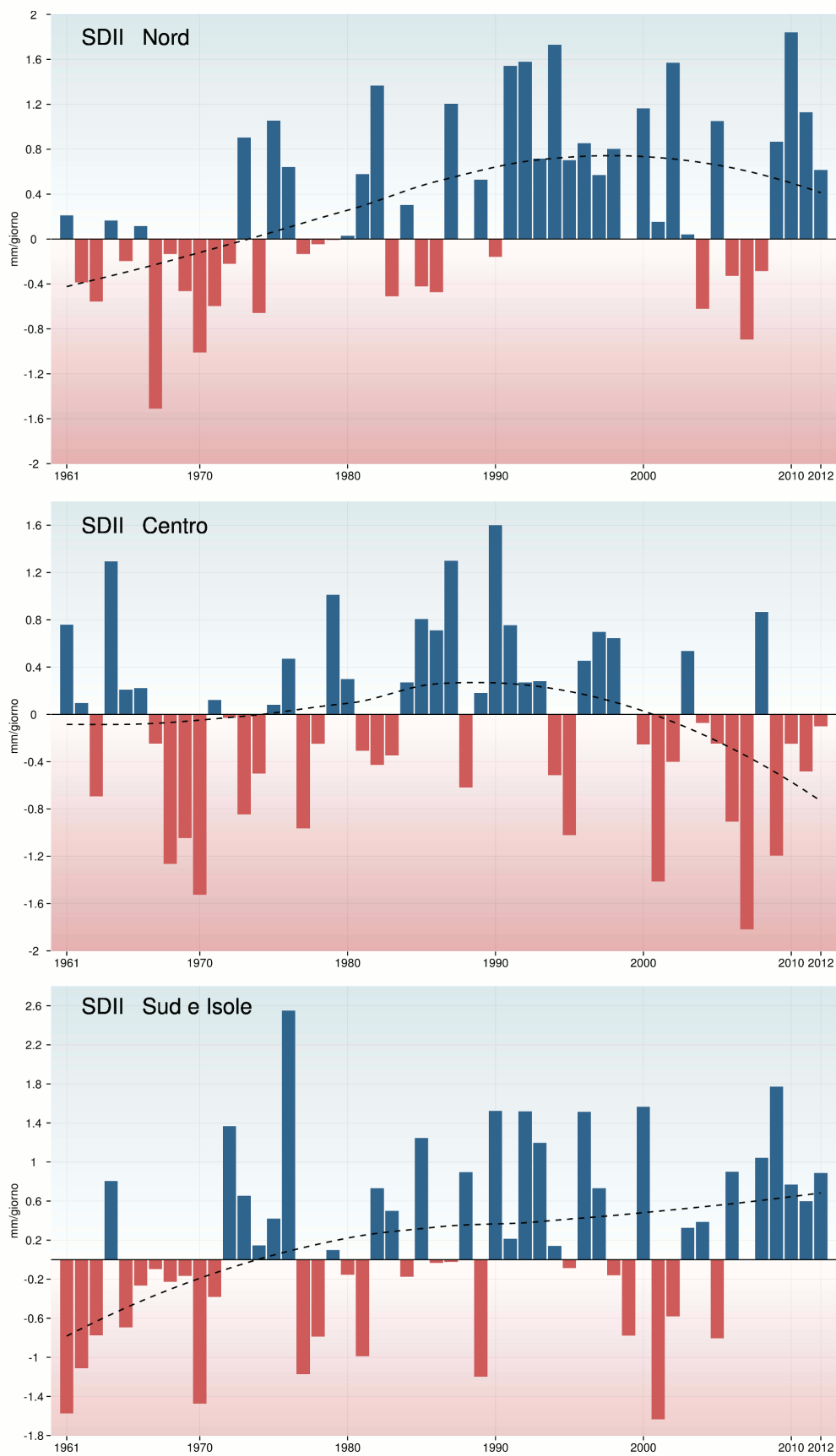


Figura 5.36 - Serie delle anomalie medie annuale dell'indice di intensità di pioggia, SDII, al Nord, Centro, Sud e Isole, rispetto al valore normale 1961-1990. Dati mancanti: 1988 e 1999, Nord; 1999, Centro; 2007, Sud e Isole.

Indice	Unità di misura	Rateo di variazione
RX1day	Mm/10 anni	(1.3)
RX5day	Mm/10 anni	(1.0)

Tabella 5.2 - Trend degli indici *RX1day* e *RX5day* in Italia, nel periodo 1961-2012. Tra parentesi sono indicati i trend statisticamente non significativi.

Indice	Unità di misura	Rateo di variazione		
		Nord	Centro	Sud e Isole
R10	Giorni/10 anni	(-1.5)	-1.2	(0.05)
R20	Giorni/10 anni	(-0.4)	(-0.39)	(0.08)
R95p	Mm/10 anni	(-6.8)	(-4.48)	12.3
SDII	mm/giorno/10 anni	0.06	(0.02)	0.24

Tabella 5.3 - Trend degli indici *R10*, *R20*, *R95p*, *SDII*, per il Nord, il Centro e il Sud e Isole, nel periodo 1961-2012. Tra parentesi sono indicati i trend statisticamente non significativi.

6. CONCLUSIONI

Al fine di individuare la presenza e valutare l'entità di variazioni degli estremi climatici in Italia nell'ultimo mezzo secolo, sono state costruite le serie temporali degli indici di estremi "moderati" di temperatura e precipitazione definiti dall'ETCCDI.

Le serie degli indici sono state sottoposte ai test statistici di riconoscimento e stima dei trend e i risultati sono stati presentati in termini di valori puntuali del rateo di variazione e di grafici che mostrano l'andamento medio in Italia di ciascun indice dal 1961 al 2012.

Praticamente tutti gli indici degli estremi di temperatura mostrano una tendenza al riscaldamento, con variazioni che in molti casi sono statisticamente significative. I trend associati all'aumento degli estremi di caldo sono in genere più marcati di quelli associati alla riduzione degli estremi di freddo. I trend lineari degli indici di temperatura sono stati stimati in modo indipendente negli intervalli di tempo 1961-2012 e 1981-2012. A conferma di quanto emerso in precedenti stime dei trend della temperatura media, i ratei di variazione nell'intervallo 1981-2012 sono quasi tutti maggiori di quello 1961-2012, e l'andamento delle serie indica che la fase di riscaldamento più significativa ha avuto inizio tra la fine degli anni '70 e l'inizio degli anni '80.

Per quanto riguarda gli estremi di precipitazione, invece, i risultati non indicano con chiarezza tendenze all'aumento o alla riduzione degli indici. Rispetto a quelli di temperatura, i trend degli indici di precipitazione hanno una minore coerenza spaziale e mostrano trend più deboli e statisticamente significativi in un numero limitato di stazioni. Per tenere conto della maggiore variabilità spaziale, quando possibile, l'analisi della variabilità è stata svolta separatamente per l'Italia settentrionale, centrale e meridionale. Tra le poche tendenze statisticamente significative, due indici (R95 e SDII) indicano un debole aumento delle precipitazioni intense al Sud e sulle Isole. Nel valutare i risultati relativi agli estremi di precipitazione va comunque considerato il numero abbastanza limitato di stazioni di misura per le quali è stato possibile determinare con sufficiente accuratezza e completezza le serie degli indici.

Riferimenti bibliografici

- Aguilar E., Auer I., Brunet M., Peterson T. C., Wieringa J., 2003: "Guidelines on climate metadata and homogenisation". World Meteorological Organization, WMO-TD No. 1186, WCDMP No. 53, Geneva, Switzerland, 55 pp.
- Aguilar E., Peterson T. C., Ramírez Obando P., Frutos R., Retana J. A., Solera M., Soley J., González García I., Araujo R.M., Rosa Santos A., Valle V. E., Brunet M., Aguilar L., Álvarez L., Bautista M., Castañón C., Herrera L., Ruano E., Sinay J.J., Sánchez E., Hernández Oviedo G. I., Obed F., Salgado J.E., Vázquez J.L., Baca M., Gutiérrez M., Centella C., Espinosa J., Martínez D., Olmedo B., Ojeda Espinoza C.E., Núñez R., Haylock M., Benavides H., Mayorga R., 2005: "Changes in precipitation and temperature extremes in Central America and northern South America, 1961 – 2003", *J. Geophys. Res.*, 110, D23107, doi:10.1029/2005JD006119.
- Alexander L. V., Zhang X., Peterson T. C., Caesar J., Gleason B., Klein Tank A.M.G., Haylock M., Collins D., Trewin B., Rahimzadeh F., Tagipour A., Rupa Kumar K., Revadekar J., Griffiths G., Vincent L., Stephenson D.B., Burn J., Aguilar E., Brunet M., Taylor M., New M., Zhai P., Rusticucci M., Vazquez-Aguirre J.L., 2006: "Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation", *J. Geophys. Res.*, 111, D05109, doi:10.1029/2005JD006290.
- Cleveland W. S., 1979: "Robust locally weighted regression and smoothing scatterplots", *J. Am. Stat. Assoc.*, 74, 829–836.
- Dai A., Wang J., Thorne P.W., Parker D.E., Haimberger L., Wang X.L., 2011: "A new approach to homogenize daily radiosonde humidity data". *J. Climate*, 24, 965-991.
- Desiato F., 2007: "SCIA, un sistema nazionale unico per i dati climatologici". ARPA, Rivista N. 1, gennaio - febbraio 2007.
- Desiato F., Fioravanti G., Frascchetti P., Perconti W., Toreti A., 2011: "Climate indicators for Italy: calculation and dissemination". *Adv. Sci. Res.*, 6, 147-150.
- Desiato F., Lena F., Toreti A., 2006: "Un sistema per tutti – climatologia: i dati italiani". *Sapere*, Anno 72, n. 2, 62-69.
- Desiato F., Lena F., Toreti A., 2007: "SCIA: a system for a better knowledge of the Italian climate". *Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata*, Vol. 48, n. 3, 351-358.
- Desiato F., Fioravanti G., Frascchetti P., Perconti W., Piervitali E., 2012: "Elaborazione delle serie temporali per la stima delle tendenze climatiche", *Rapporto ISPRA, Serie Stato dell’Ambiente 32/2012*.
- Frich P., Alexander L. V., Della-Marta P., Gleason B., Haylock M., Klein Tank A.M. G., Peterson T., 2002: "Observed coherent changes in climatic extremes during the second half of the twentieth century", *Clim. Res.*, 19, 193 – 212.
- IPCC, 2001: "Climate Change 2001: The scientific basis". Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climatic Change. Cambridge University Press, NY, USA.
- IPCC, 2007: "Climate Change 2007: The physical science basis". Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climatic Change. Cambridge University Press, NY, USA.
- Jones P. D., Moberg A., 2003: "A hemispheric and large-scale surface air temperature variations: An extensive revision and an update to 2001", *J. Climate.*, 16, 206 – 223.
- Kendall, M.G., 1976: "Rank Correlation Methods", 4th Ed. Griffin.
- Klein Tank A. M. G., Wijngaard J. B., Können G. P., Böhm R., Demarée G., Gocheva A., Mileta M., Pashiardis S., Hejkrlik L., Kern-Hansen C., Heino R., Bessemoulin P., Müller-Westermeier G., Tzanakou M., Szalai S., Pálsdóttir T., Fitzgerald D., Rubin S., Capaldo M., Maugeri M., Leitass A., Bukantis A., Aberfeld R., van Engelen A.F.V., Forland E., Mielus M., Coelho F., Mares C., Razuvaev V., Nieplova E., Cegnar T., Antonio López J., Dahlström B., Moberg A., Kirchhofer K., Ceylan A., Pachaliuk O., Alexander L.V., Petrovic P., 2002: "Daily dataset of 20th- century surface air temperature and precipitation series for the European Climate Assessment", *Int. J. Clim.*, 22, 1441–1453.
- Klein Tank A. M. G., Können G. P., 2003: "Trends in Indices of Daily Temperature and Precipitation Extremes in Europe, 1946–99". *J. Climate.*, 16, 3665-3680.
- Klein Tank A. M. G., Peterson T. C., Quadir D. A., Dorji S., Zou X., Tang H., Santhosh K., Joshi U.R., Jaswal A.K., Kolli R. K., Sikder A.B., Deshpande N.R., Revadekar J. V., Yeleuova K., Vandasheva S., Faleyeva M., Gomboluudev P., Budhathoki K.P., Hussain A., Afzaal M., Chandrapala L., Anvar H., Amanmurad D.,

-
- Asanova V.S., Jones P.D., New M.G., Spektorman T., 2006: "Changes in daily temperature and precipitation extremes in central and south Asia", *J. Geophys. Res.*, 111, D16105, doi:10.1029/2005JD006316.
- Klein Tank A. M.G., Zwiers F. W., Zhang X., 2009: "Guidelines on Analysis of extremes in a changing climate in support of informed decisions for adaptation", *Climate Data and Monitoring WCDMP*, 72, WMO-TD N. 1500, 56pp.
- Kostopoulou E., Jones P.D., 2005: "Assessment of climate extremes in the Eastern Mediterranean", *Meteorol. Atmos. Phys.*, 89, 69–85.
- Mann H. B., 1945: "Nonparametric tests against trend", *Econometrica*, 13, 245-259.
- Ostrom C. W., 1990: "Time Series Analysis Regression Techniques - 2nd ed.", Sage University Paper.
- Peterson T.C., Folland C., Gruza G., Hogg W., Mokssit A. e Plummer N., 2001: "Report on the activities of the Working Group on Climate Change Detection and Related Rapporteurs 1998-2001". World Meteorological Organization, Rep. WCDMP-47, WMO-TD 1071, Geneva, Switzerland, 143 pp.
- Reeves J., Chen J., Wang X. L. L., Lund R., Lu Q.Q., 2007: "A review and comparison of changepoint detection techniques for climate data", *J. Appl. Meteorol. and Climatol.*, 46, 900-915.
- Sen P. K., 1968: "Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau", *Journal of the American Statistical Association* 63: 1379–1389, JSTOR 2285891, MR 0258201.
- Tomozeiu R., Pavan V., Cacciamani C., Amici M., 2006: "Observed temperature changes in Emilia-Romagna: mean values and extremes", *Clim. Res.*, 31, 217–225.
- Toreti A., Desiato F., 2007: "Temperature trend over Italy from 1961 to 2004". *Theor. Appl. Climatol.*, 91, 51–58.
- Toreti A., Desiato F., 2008: "Changes in temperature extremes over Italy in the last 44 years", *Int. J. Climat.*, 28, 733-745.
- Vincent L.A., 1998: "A technique for the identification of inhomogeneities in Canadian temperature series". *J. Climate*, 11, 1094–1104.
- Vincent L. A., Zhang X., 2001: "Homogenization of daily temperatures over Canada". *J. Climate*, 15, 1322-1334
- Vincent L. A., Aguilar E., Saindou M., Hassane A.F., Jumaux G., Roy D., Booneady P., Virasami R., Randriamarolaza L.Y.A., Faniriantsoa F.R., Amelie V., Seeward H., Montfraix B., 2011: "Observed trends in indices of daily and extreme temperature and precipitation for the countries of the western Indian Ocean, 1961–2008", *J. Geoph. Res.*, 116 (D10), 1984 - 2012.
- von Storch H., 1995: Misuses of statistical analysis in climate research. *Analysis of Climate Variability*, H. von Storch and A. Navarra, Eds., Springer, 11–26.
- Wang X. L., Swail V.R., 2001: "Changes in extreme wave heights in northern hemisphere oceans and related atmospheric circulation regimes". *J.Climate*, 14: 2204-2221.
- Wang X. L., Wen Q.H., Wu Y., 2007: "Penalized maximal t Test for detecting undocumented mean change in climate data series" *J. Appl. Meteor. Climatol.*, 46, 916–931.
- Wang X. L., 2008: "Penalized Maximal F Test for Detecting Undocumented Mean Shift without Trend Change". *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 25, 368–384.
- Wijngaard J. B., Klein Tank A. M. G., Können G. P., 2003: "Homogeneity of 20th century European daily temperature and precipitation series", *Int. J. Climat.*, 23, 679-692.
- Wilks D. S., 2011: "Statistical methods in the atmospheric sciences – 3rd ed.", Academic Press.
- Yue S., Pilon P., Phinney B., Cavadas G., 2002: "The influence of autocorrelation on the ability to detect trend in hydrological series", *Hydrol. Process.* 16, 1807-1829.
- Zhang X., Yang F., 2004: "RCLimindex 1.0 User Manual" http://www.climdex.org/climdex_software.html.