



Analisi di Vulnerabilità Climatica della Città di Torino



a cura del

Dipartimento Rischi Naturali e Ambientali
Arpa Piemonte, Marzo 2020

con il coordinamento

dell' Assessorato per le Politiche Ambientali
e Area Ambiente

Progettazione grafica e impaginazione

Andrea Sassano (Fondazione Contrada Torino Onlus)



p.4	1. Introduzione
p.6	2. Il clima a Torino - Osservazioni
p.7	2.1 Temperature
p.7	2.1.1 Andamenti annuali
p.9	2.1.2 Andamenti stagionali e mensili
p.14	2.1.3 Temperature estreme (massime estive, minime invernali)
p.15	2.1.4 Ciclo diurno
p.17	2.1.5 Notti tropicali
p.18	2.1.6 Giorni di gelo
p.19	2.2 Precipitazioni
p.19	2.2.1 Precipitazioni annuali
p.20	2.2.2 Precipitazioni stagionali
p.23	2.2.3 Numero giorni piovosi
p.25	2.2.4 Precipitazioni intense
p.32	2.3 Portate
p.38	2.4 Neve
p.40	2.5 Vento
p.40	2.5.1 Vento medio
p.42	2.5.2 Massima raffica
p.43	3 Il clima a Torino - Gli effetti
p.43	3.1 Gradi giorno
p.44	3.2 Ondate di caldo
p.44	3.2.1 Definizione di ondate di caldo
p.50	3.2.2 Ondate di caldo e mortalità
p.50	3.2.3 Ondate di caldo e consumi energetici
p.53	3.3 Siccità
p.56	3.4 Pollini

p.59 4 Il clima a Torino - Scenari futuri

p.59 4.1 Considerazioni generali

p.59 4.2 Modellistica utilizzata

p.60 4.3 Analisi delle temperature nello scenario RCP 4.5

p.67 4.4 Analisi temperature scenario RCP 8.5

p.73 4.5 Analisi precipitazioni scenario RCP 4.5

p.77 4.6 Analisi precipitazioni scenario RCP 8.5

p.81 4.7 Siccità secondo lo scenario RCP 4.5 e RCP 8.5

p.83 4.8 Ondate di caldo (effetti sulla mortalità, effetti sui consumi energetici)

p.87 **5 Tabella di riepilogo per le temperature massime, medie e minime**

p.88 **6 Tabella di riepilogo sulle precipitazioni**

p.89 **7 Tabella di riepilogo per le ondate di calore**

p.90 **8 Tabella di riepilogo per gli indici biometereologici**

1 Introduzione

Il rapporto di sintesi “Climate Change 2014”, pubblicato nel 2015 dal Panel Intergovernativo per i Cambiamenti Climatici¹, e nel quale sono richiamate le conclusioni dei tre Gruppi di lavoro che hanno concorso a redigerlo, sancisce in modo inequivocabile il riscaldamento globale e gli impatti sulle altre componenti del sistema climatico, evidenziando come il fattore umano sia ritenuto la causa dominante del riscaldamento globale dal 95% della comunità scientifica internazionale. Il rapporto infatti asserisce, con un livello di probabilità superiore al 95%, che le attività antropiche sono responsabili di più del 50% dell'aumento di temperatura registrato fra 1951 e 2010.

Le concentrazioni di gas ad effetto serra sono cresciute a partire dall'era preindustriale raggiungendo livelli che non hanno precedenti nella storia dell'umanità. La concentrazione di anidride carbonica, metano e protossido di azoto è aumentata dal 1750 ad oggi del 40%, 150% e 20%, raggiungendo i valori più elevati degli ultimi 800.000 anni e sta continuando ad aumentare: il 2016 è stato l'anno in cui la concentrazione di CO₂ è stata al di sopra dei 400 p.p.m. in modo costante; nel 2017 diversi mesi hanno registrato il record di concentrazione nella storia dell'umanità.

La temperatura media globale è aumentata di 0,85°C dal 1880 ad oggi, con un aumento di 0.12°C/decennio nel periodo 1951–2012, la temperatura superficiale dell'oceano è aumentata (dal 1971 al 2010 l'aumento supera 0.11°C/decennio nei primi 75m), il livello globale medio del mare dal 1901 al 2010 è cresciuto di 0.19m. L'estensione ed il volume dei ghiacci si sono ridotti, la copertura nevosa nell'emisfero nord è diminuita e il permafrost è in generale degradazione. L'anno 2015 e successivamente l'anno 2016 sono risultati i più caldi da quando sono cominciate le misurazioni strumentali della temperatura.

I cambiamenti climatici osservati dal 1950 ad oggi, compresi gli eventi estremi, hanno determinato impatti diffusi sui sistemi naturali e antropici, dimostrando l'elevata suscettibilità dei sistemi naturali e della società umana al clima e alla sua evoluzione.

Continuare ad emettere gas climalteranti in atmosfera produrrà un ulteriore riscaldamento e cambiamenti di lunga durata di tutte le componenti del sistema clima aumentando la probabilità di impatti severi, pervasivi e irreversibili per le persone e i sistemi naturali e antropici.

Sono infatti le emissioni cumulative di anidride carbonica che concorrono a determinare il riscaldamento della superficie terrestre nella seconda parte del 21° secolo e oltre. Le proiezioni sulle emissioni future di gas climalteranti variano in un range molto ampio di valori che dipendono dallo sviluppo socioeconomico e dalle politiche sul clima. In tutti gli scenari ipotizzati, le proiezioni indicano un aumento della temperatura media superficiale nel corso del secolo, almeno di 1.5°C oltre il livello preindustriale. Senza misure significative di mitigazione, ossia di riduzione sostanziale e prolungata nel tempo delle emissioni di gas serra, la temperatura potrebbe crescere nel range di 2°C–4°C e più.

E' molto probabile che il riscaldamento globale determini un aumento della frequenza e intensità delle ondate di calore e dei periodi di siccità. Nello stesso tempo anche gli eventi di precipitazione intensa saranno più frequenti in molte regioni. Gli oceani continueranno a riscaldarsi e acidificarsi e il livello medio dei mari a crescere.

Al fine di evitare che il riscaldamento globale possa raggiungere livelli pericolosi per la vita sul nostro pianeta il rapporto sollecita sostanziali riduzioni delle emissioni in atmosfera di gas ad effetto serra.

Il cambiamento climatico infatti amplificherà gli attuali rischi e ne determinerà di nuovi per le persone e i sistemi naturali e antropici. I rischi saranno distribuiti in modo non uniforme e saranno generalmente più grandi per le popolazioni e le comunità svantaggiate dei paesi ad ogni livello di sviluppo. Non è da sottovalutare che la possibilità di improvvisi e irreversibili cambiamenti del clima aumenti con il crescere del riscaldamento. Molti aspetti del cambiamento climatico e degli impatti ad essi associati continueranno per secoli anche se le emissioni antropiche di gas serra saranno azzerate.

1 http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/syr/SYR_AR5_FINAL_full_wcover.pdf

Adattamento e mitigazione sono quindi strategie complementari per ridurre e gestire i rischi del cambiamento climatico. Sostanziali riduzioni nelle emissioni nelle prossime decadi possono ridurre il rischio climatico nel 21° secolo e oltre, aumentare la probabilità di un efficace adattamento, ridurre i costi e le sfide della mitigazione nel lungo termine e contribuire ad uno sviluppo sostenibile e resiliente ai cambiamenti del clima. Efficaci decisioni per limitare il cambiamento climatico e i suoi effetti negativi devono essere basate su un ampio spettro di approcci analitici per valutare rischi e benefici attesi, anche in termini economici, ma nello stesso tempo includere strumenti di governance innovativa, tenere conto della dimensione etica, dell'equità, dei valori e delle diverse percezioni e risposte al rischio e alle incertezze.

L'impostazione di un Piano di Adattamento della Città di Torino, che si basi sulle caratteristiche climatiche della città e sulla loro possibile evoluzione futura, ha lo scopo di favorire l'adozione di misure di adattamento, una revisione della pianificazione settoriale e del governo del territorio che tenga conto dei nuovi o più gravosi impatti dovuti al cambiamento climatico e, insieme, di dare alla dimensione cittadina caratteristiche ambientali e urbanistiche che ne migliorino la qualità della vita e l'attrattività.

2 Il Clima a Torino - osservazioni

Anche in Piemonte si osservano dei cambiamenti nel clima locale: un'aumentata variabilità, con frequenti eventi “fuori stagione” e una rapida alternanza degli estremi, l'intensificazione degli eventi intensi; una mutata condizione della montagna in particolare alle quote alte, che determinano una serie di impatti indotti sull'attività agro-silvo-pastorale, sul turismo, sui rischi naturali. Un aumento delle temperature, in particolare della massima estiva e delle temperature autunnali, che causano un aumento delle condizioni favorevoli allo sviluppo e alla propagazione degli incendi boschivi e minacciano le riserve idriche più durature, rappresentate dai ghiacciai, dalla neve e dal permafrost.

Le aree urbane soffrono, in particolare, degli effetti delle ondate di calore sulla salute, che si traducono in un aumento della mortalità e della morbidità, in un prolungato e anticipato periodo di pollinazione con l'insorgenza di nuovi casi di allergopatie e con la diffusione di malattie trasmesse da vettori favoriti dal riscaldamento dell'atmosfera. Ma le ondate di calore determinano impatti anche sulla gestione del verde urbano e sulla disponibilità idrica, aumentando lo stress a cui sono sottoposti i processi industriali.

Un'attenta analisi dei dati osservati consente di evidenziare alcuni cambiamenti nelle variabili meteorologiche, sia sui trend di più lungo periodo sia sulla variabilità inter-annuale e sugli eventi estremi.

Il lavoro qui presentato fa il punto su come il cambiamento climatico è stato “misurato dalla città in modo da costituire una base di partenza per evidenziare quali azioni, in quali settori e con quale urgenza, è necessario intraprendere per limitare gli impatti negativi.

La scelta è stata quella di utilizzare i dati osservati dalla metà del secolo scorso, sia per l'affidabilità del dataset, che non risente pesantemente di modifiche della strumentazione e della localizzazione, sia soprattutto per evidenziare i cambiamenti che risultano evidenti “a memoria d'uomo e dare così evidenza della rapidità con cui gli eventi meteorologici stanno rispondendo al riscaldamento globale.

Si segnala tuttavia una interruzione nella serie temporale dei dati di temperatura, in cui risulta mancante l'anno 1987, a causa di un aggiornamento della stazione di misura scelta a riferimento.

2.1 Temperature

2.1.1 Andamenti annuali

Analizzando le temperature registrate a Torino dal 1951 al 2019 si osserva un aumento rilevante e una tendenza significativa all'aumento sia nelle temperature massime sia nelle temperature medie, mentre le temperature minime risultano pressoché stazionarie o in lievissima diminuzione (Figura 1).

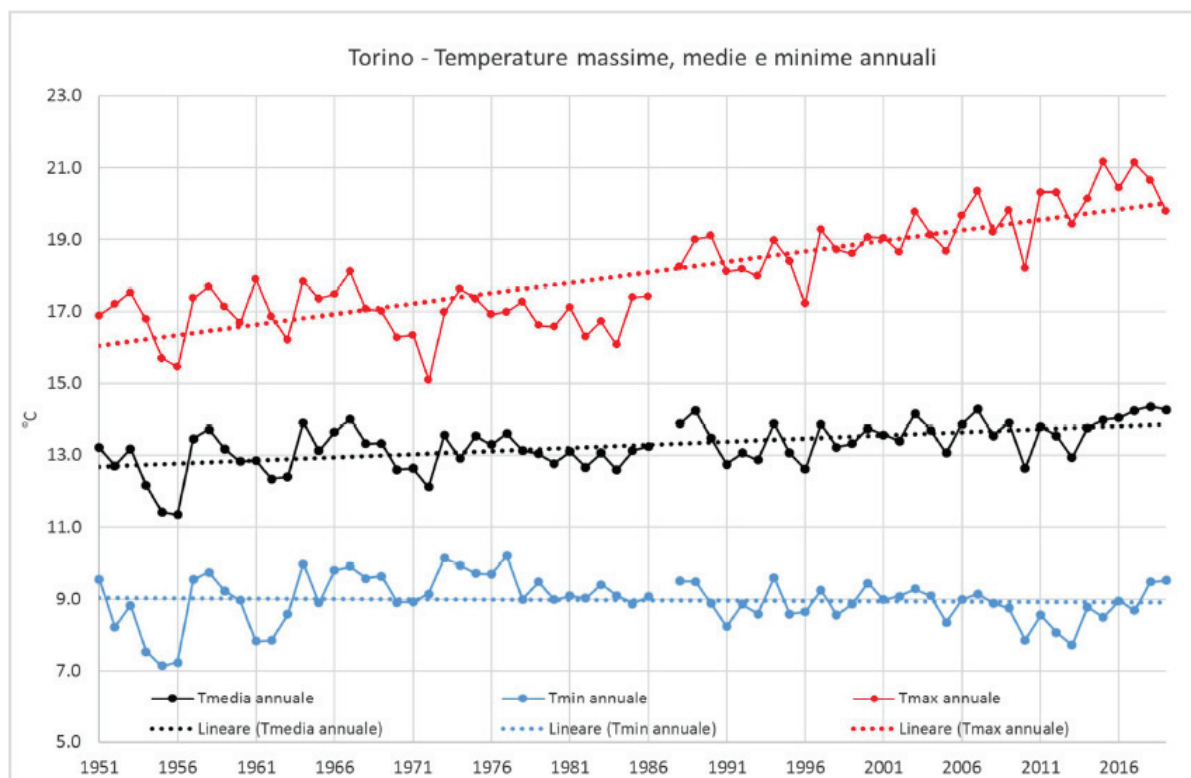


Figura 1 Temperature massime (in rosso), medie (in nero) e minime (in blu) annuali a Torino dal 1951 al 2019 e rispettive linee di tendenza.

In particolare, le temperature massime mostrano un trend significativo (intervallo di confidenza del 95%) pari a circa 0.5°C ogni 10 anni e gli ultimi 30 anni sono quelli che hanno maggiormente contribuito al riscaldamento, con un trend di circa 0.7°C ogni 10 anni (Figura 2).

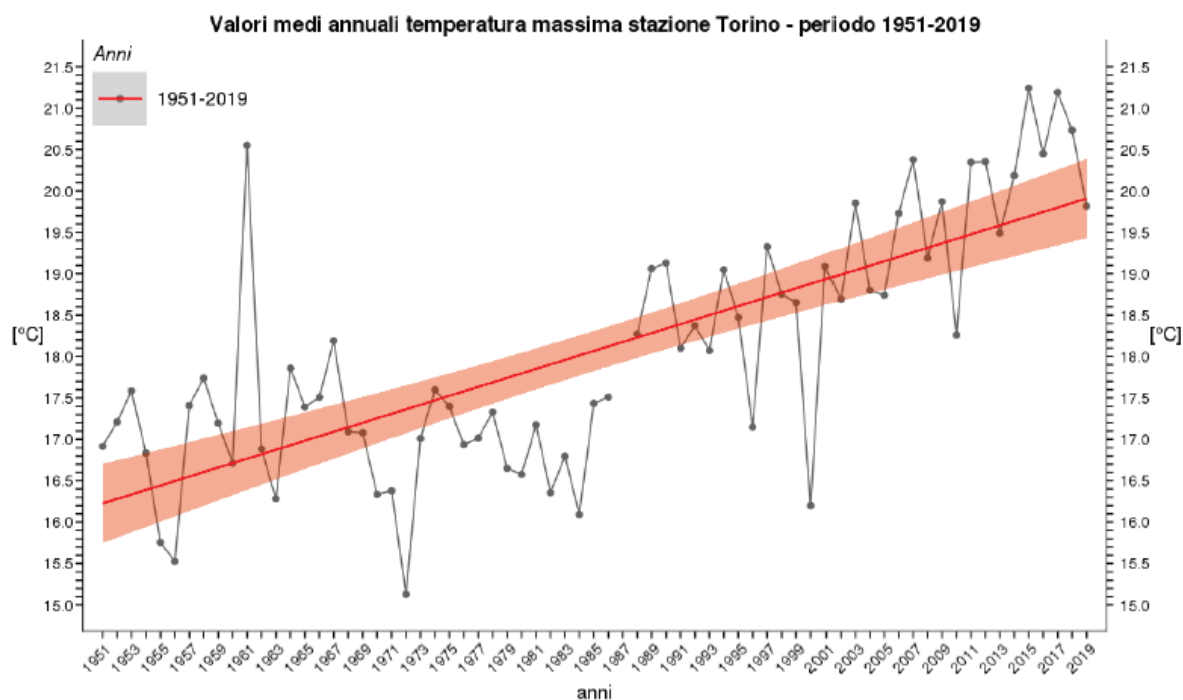


Figura 2 Andamento delle temperature massime annuali dal 1951 al 2019, in rosso il trend e l'intervallo di confidenza del trend.

La temperatura media è aumentata di circa 0.17°C ogni 10 anni. Negli ultimi quindici anni in particolare, si osserva come la temperatura media sia stata sempre al disopra della norma del trentennio di riferimento (1971-2000) per un aumento complessivo stimato di circa 1°C in 50 anni. L'analisi delle anomalie della temperatura media annuale mostra una tendenza positiva, con anomalie positive soprattutto nei primi anni del nuovo millennio (Figura 3).

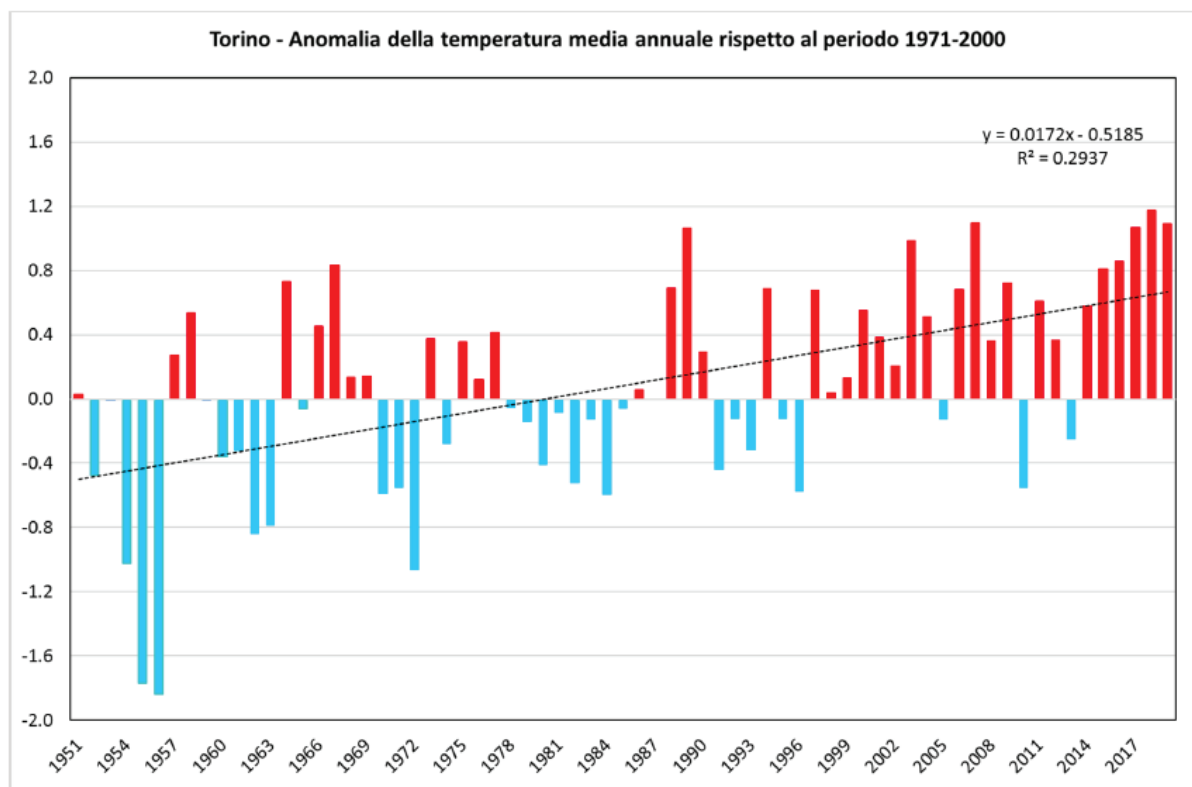


Figura 3 Anomalia della temperatura media annuale a Torino dal 1951 al 2019 rispetto al periodo di riferimento 1971-2000. In blu le anomalie negative (anni più freddi rispetto al periodo di riferimento) in rosso le anomalie positive (anni più caldi).

Da notare come gli anni 2007 e 1989 siano stati mediamente i più caldi degli ultimi 50 anni a Torino e che solo il 2005, il 2010 e il 2013 mostrino una tendenza inversa rispetto al comportamento medio delle annate del nuovo millennio.

Considerando le anomalie della temperatura massima, calcolate rispetto al periodo 1971-2000, si evince che risultano sempre positive a partire dal 1988 e mostrano una decisa tendenza all'aumento; mentre per le temperature minime si osserva una lieve tendenza negativa, con gli ultimi anni che presentano frequenti anomalie negative (Figura 4). Questo andamento negli anni più recenti dà conto di un'aumentata variabilità meteorologica, con temperature minime più basse e massime mediamente più alte.

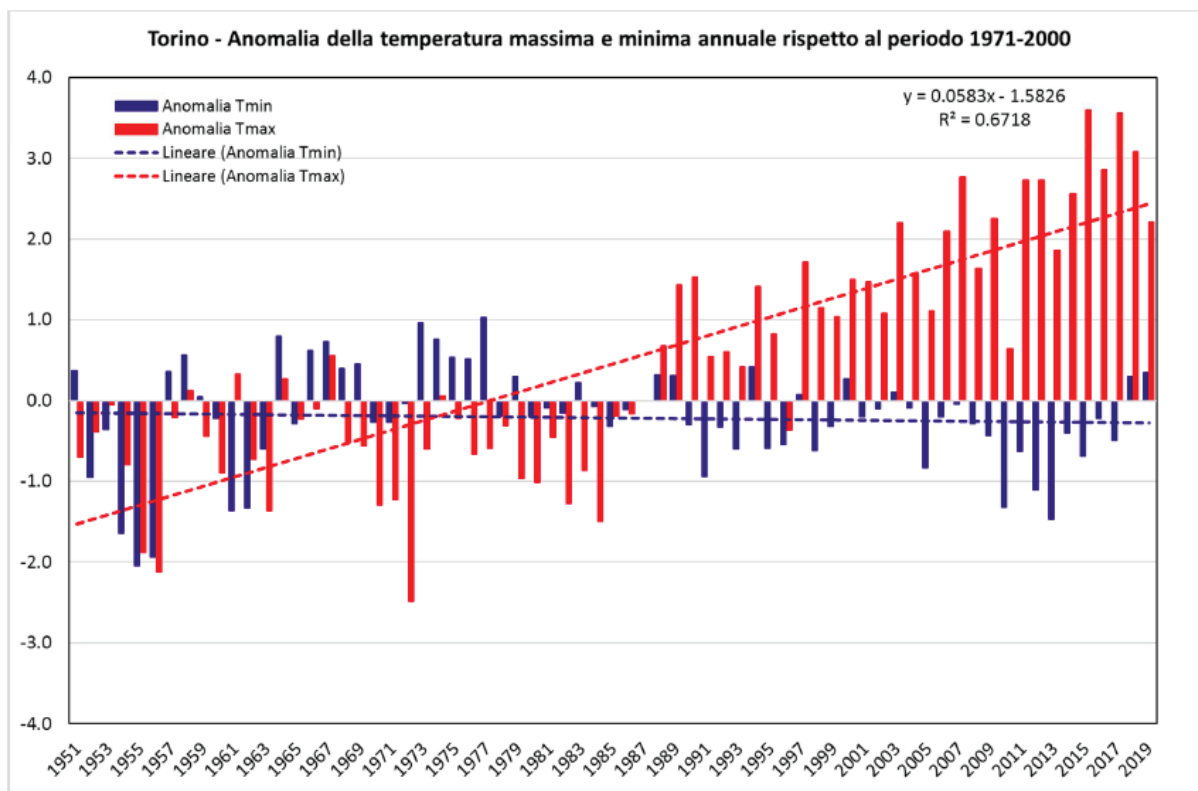


Figura 4 Anomalia della temperatura massima (in rosso) e minima (in blu) annuale a Torino dal 1951 al 2019 rispetto al periodo di riferimento 1971-2000.

2.1.2 Andamenti stagionali e mensili

Anche gli andamenti delle temperature massime e medie mensili confermano la tendenza all'aumento delle temperature. Per evidenziare il cambiamento più recente, sono stati considerati gli ultimi quindici anni rispetto all'intero periodo 1951-2019. Le massime risultano decisamente più elevate, mentre le minime confermano una stazionarietà o una lieve diminuzione rispetto all'intero periodo (Figura 5).

L'aumento delle temperature massime è distribuito nel corso dell'intero anno, con un valore superiore nel periodo estivo.

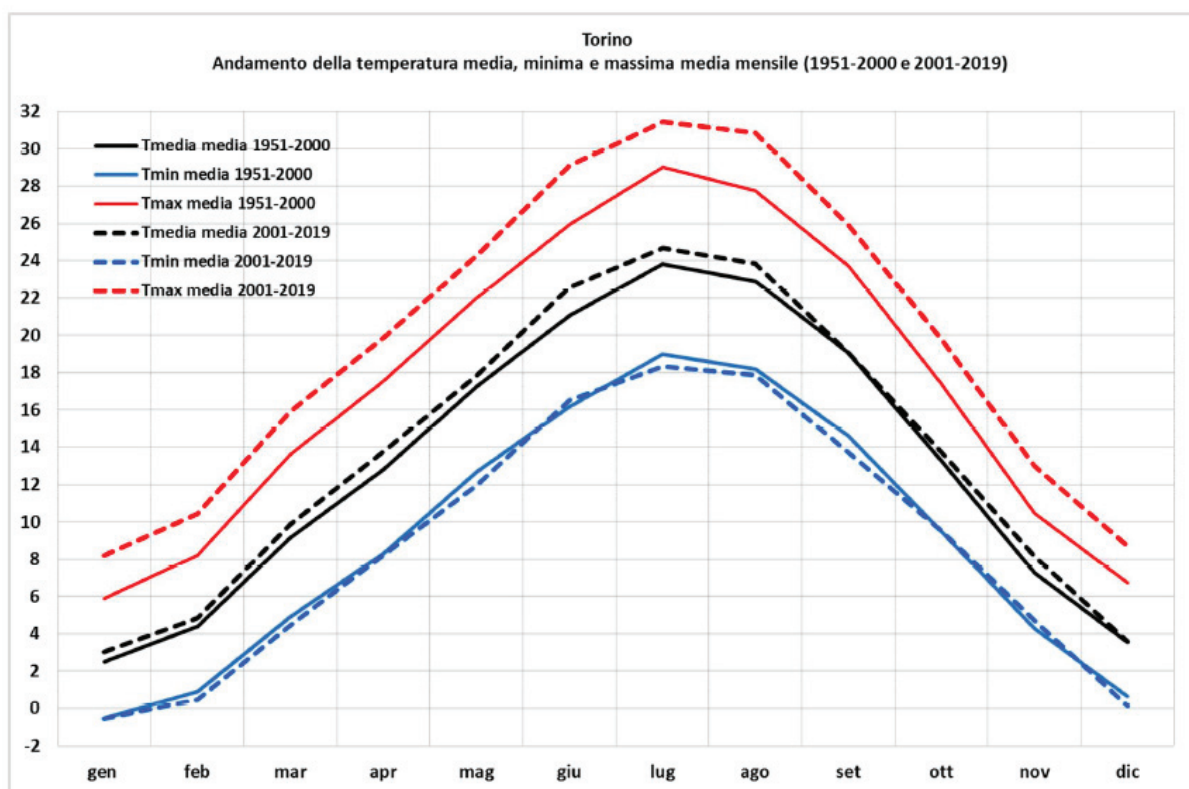


Figura 5 Andamento della temperatura media (in nero), minima (in blu) e massima (in rosso) mensile mediata sul periodo 1951-2019 e della temperatura media (in nero tratteggiato), minima (in blu tratteggiato) e massima (in rosso tratteggiato) mensile mediata sul periodo 2001-2019.

Sono state anche analizzate le temperature stagionali (medie, massime e minime) dal 1951 al 2019.

Considerando la stagione invernale (mesi di dicembre, gennaio e febbraio), emergono l'inverno 1955-1956, ed in particolare il mese di febbraio 1956 quando un'ondata eccezionale di freddo investì buona parte dell'Europa e dell'Italia, coprendola di neve e gelo. Da notare anche l'inverno 2006, caratterizzato da temperature elevate e anomale per il periodo (Figura 6). La tendenza delle temperature massime risulta positiva e si può distinguere un comportamento diverso degli ultimi 30 anni rispetto ai 30 precedenti.

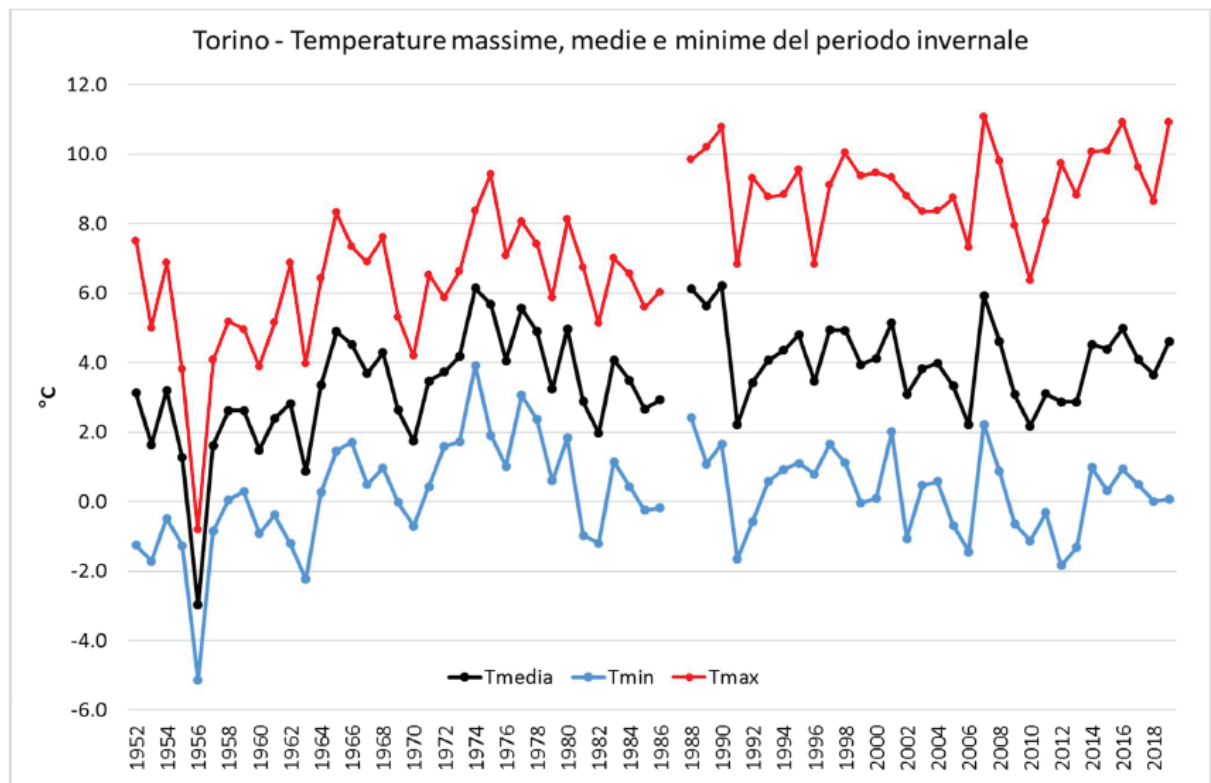


Figura 6 Temperatura media (in nero), minima (in blu) e massima (in rosso) del periodo invernale (DJF).

Considerando il periodo primaverile, si osserva una tendenza positiva delle temperature massime e medie superiore a quella invernale, con una variabilità inter-annuale più spiccata; le temperature minime mostrano una lieve tendenza alla diminuzione (Figura 7).

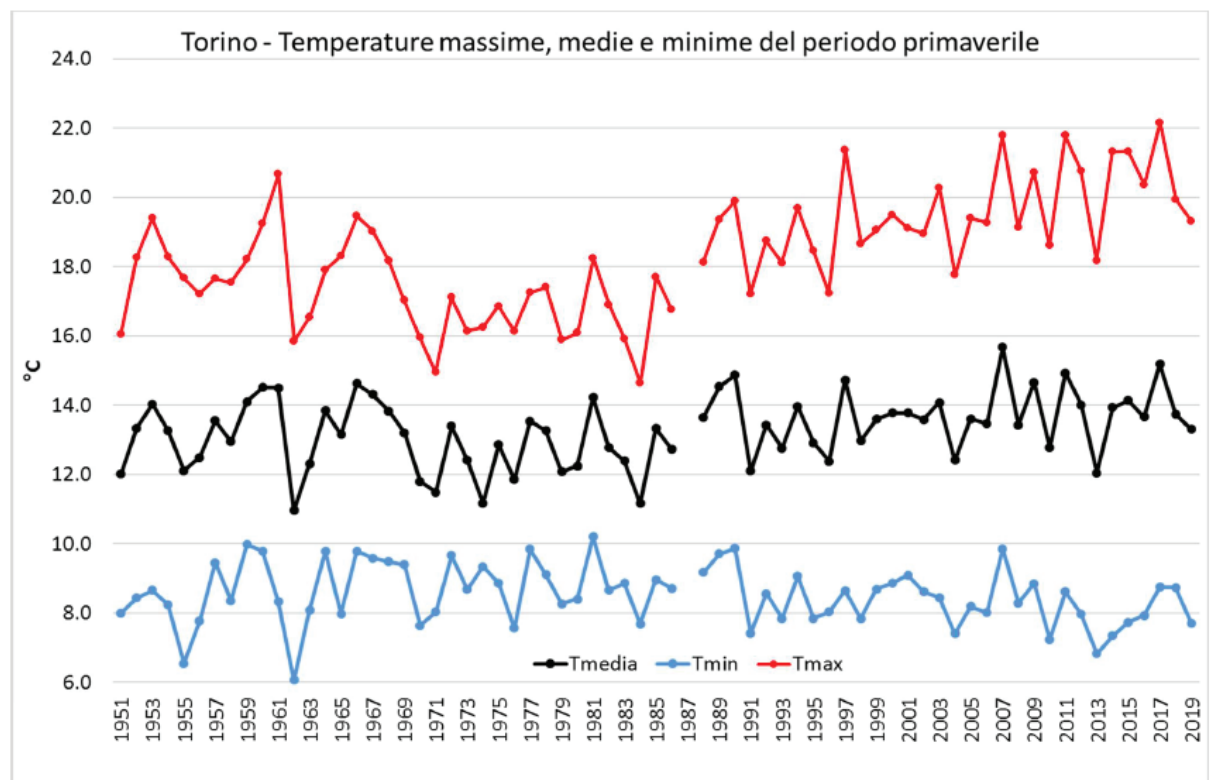


Figura 7 Temperatura media (in nero), minima (in blu) e massima (in rosso) del periodo primaverile (MAM).

Le stesse osservazioni sono valide per il periodo estivo, anche se l'aumento delle temperature massime e medie è più marcato soprattutto nell'ultimo periodo. Le temperature minime, pur seguendo la variabilità inter-annuale, mostrano una lieve tendenza alla diminuzione. Da notare il picco dell'estate 2003, seguito da quello del 2015 e del 2017 (Figura 8). Se l'estate del 2003 era considerata, fino a pochi anni fa, come un evento assolutamente anomalo, le elevate temperature delle estati più recenti hanno ridimensionato l'eccezionalità dell'evento.

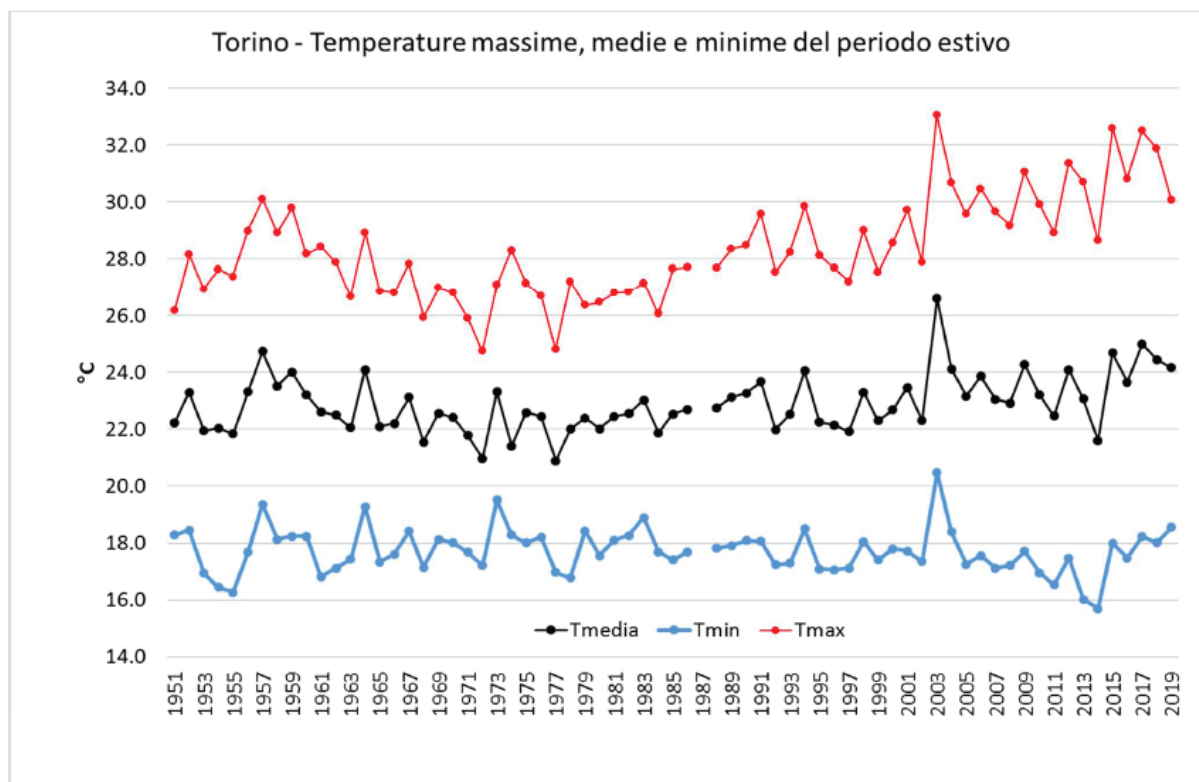


Figura 8 Temperatura media (in nero), minima (in blu) e massima (in rosso) del periodo estivo (JJJ).

Nel periodo autunnale le temperature massime mostrano ancora una tendenza positiva; meno marcata è la crescita delle medie, le minime sono pressoché stazionarie (Figura 9).

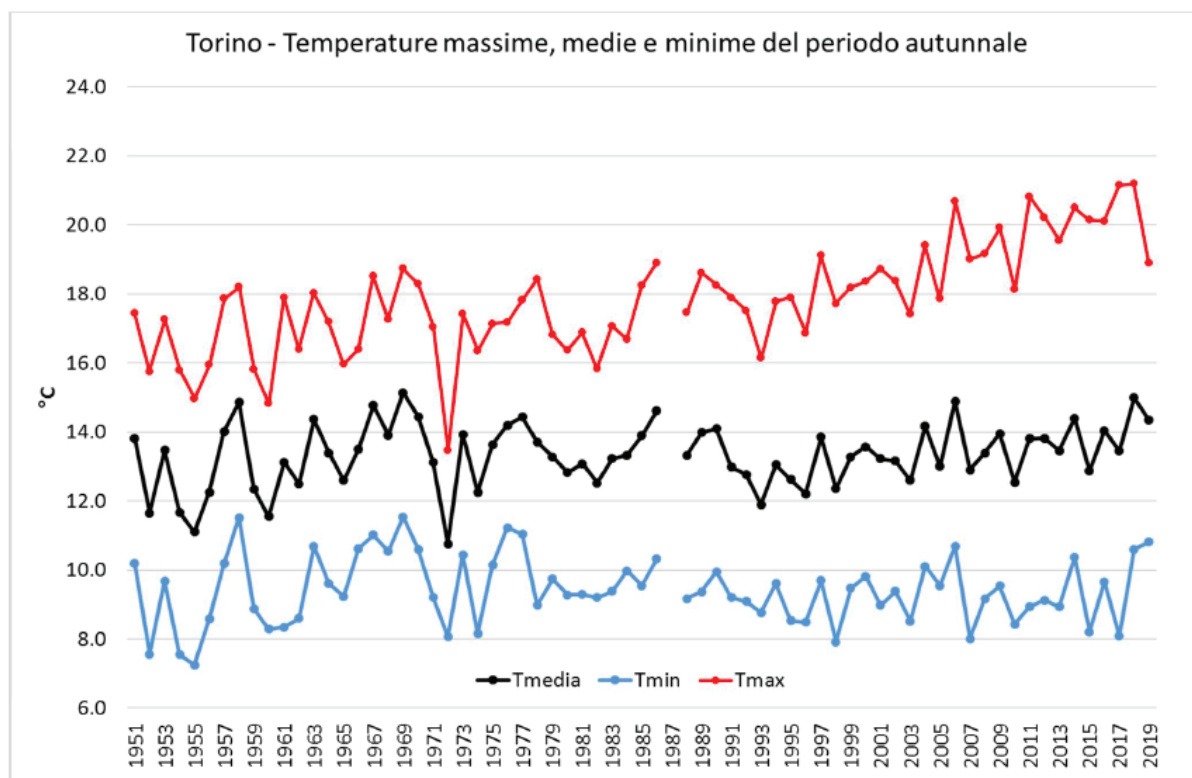


Figura 9 Temperatura media (in nero), minima (in blu) e massima (in rosso) del periodo autunnale (SON).

Negli ultimi 30 anni la tendenza, in particolare della temperatura massima, è positiva, con incrementi considerevoli nelle stagioni estive e autunnali, come si evince dalla tabella sottostante.

Tabella 1 Tendenza della temperatura massima in °C ogni 10 anni per il periodo dal 1987 al 2019.

Tendenza temperatura massima (°C in 10 anni) negli ultimi 30 anni	
DJF	0.29
MAM	0.88
JJA	1.24
SON	1.28

2.1.3 Temperature estreme (massime estive, minime invernali)

Interessante è osservare come l'effetto dell'aumento del riscaldamento si rifletta anche sulla forma della distribuzione in frequenza della temperatura stessa, modificandone così non solo il valore medio ma anche gli estremi.

Confrontando, ad esempio, la distribuzione della temperatura massima giornaliera estiva del periodo 1981-2019 con quella del periodo precedente, 1951-1980, si evidenzia un aumento della mediana e di tutti i percentili più elevati: del 95° percentile di circa 1°C e del 99° percentile di quasi 1°C (Figura 10).

Il valore del 50° percentile (pari a 27.8°C) nella distribuzione più recente si verifica solo il 32% dei giorni. Il valore del 95° percentile (pari a 33.6°C) e del 99° percentile (pari a 36.59°C) si presentano rispettivamente il 90% e il 98% dei giorni.

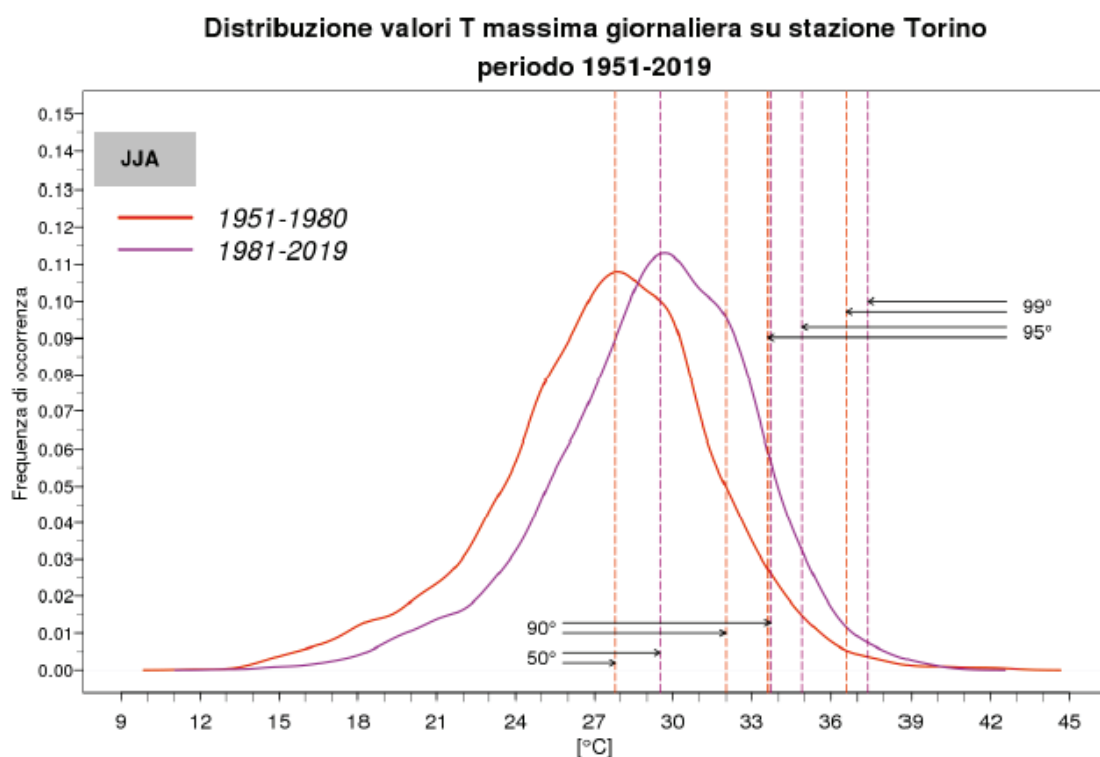


Figura 10 Distribuzione dei valori di temperatura massima nel periodo estivo a Torino nel periodo 1951-1980 (rosso) e 1981-2019 (viola). Le linee verticali rappresentano i percentili (50°, 95° e 99°) delle due distribuzioni.

Per quanto riguarda la distribuzione delle temperature minime invernali si evince invece un lieve spostamento verso sinistra della distribuzione, di conseguenza i valori dei percentili alti tendono a diminuire, di circa mezzo grado. Il 50°, 95° e 99° percentile diventano, nella distribuzione corrispondente al periodo più recente, il 57°, il 97° e il 99°. Questo sembra testimoniare una tendenza alla diminuzione delle minime invernali, in particolare nei valori attorno alla media.

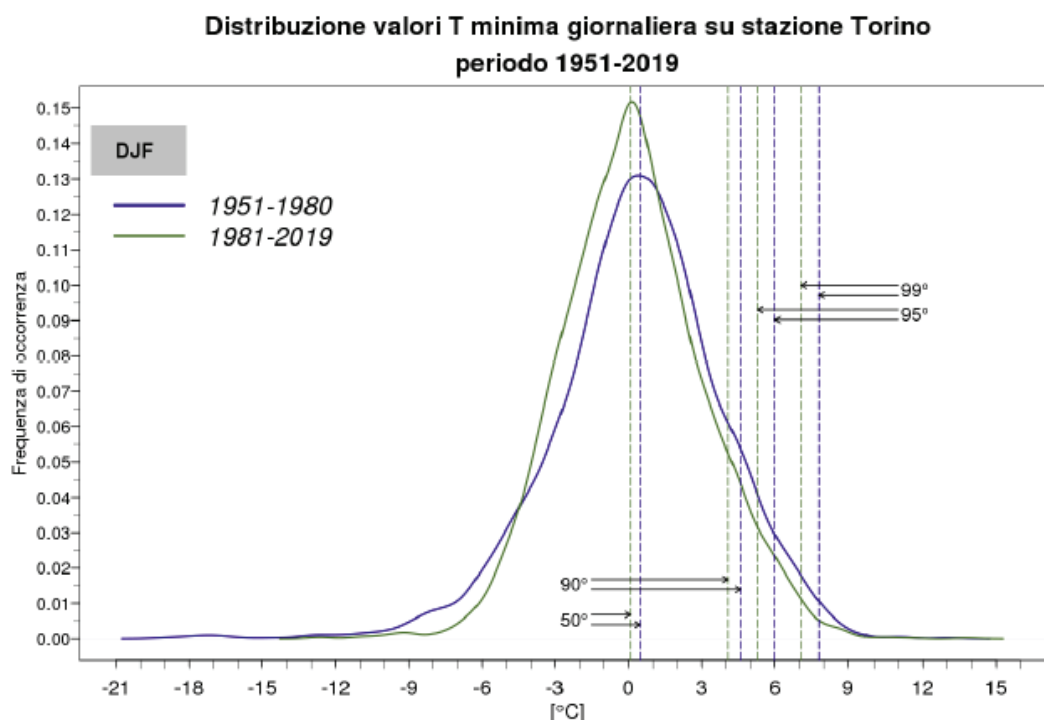


Figura 11 Distribuzione dei valori di temperatura minima nel periodo invernale a Torino nel periodo 1951-1980 (blu) e 1981-2019 (grigio). Le linee verticali rappresentano i percentili (50°, 95° e 99°) delle due distribuzioni.

2.1.4 Ciclo diurno

Le variazioni del clima hanno apportato e continuano ad apportare anche modifiche al ciclo diurno della temperatura. Utilizzando i dati orari della stazione di monitoraggio di Torino Giardini Reali, appartenente alla rete regionale di Arpa Piemonte, è possibile calcolare e rappresentare l'andamento medio della temperatura giornaliera (ciclo giornaliero). Dal grafico (Figura 12) si evince un aumento della temperatura nella parte diurna del ciclo giornaliero, più significativa se si considerano i dati degli ultimi anni 20 anni rispetto ai dieci anni precedenti. Questa modifica nel ciclo diurno è significativa per gli aspetti legati all'evapotraspirazione con implicazioni, ad esempio, sull'agricoltura.

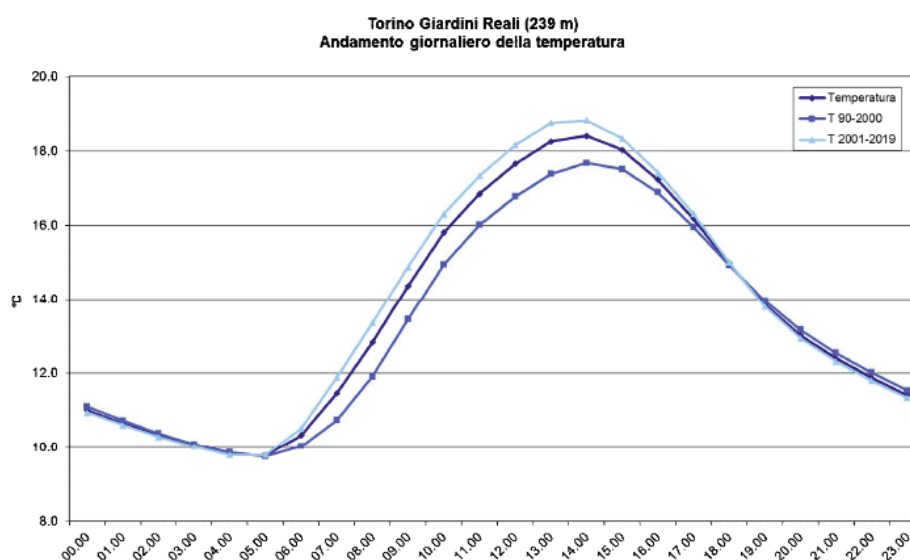


Figura 12 Ciclo diurno della temperatura per la stazione di monitoraggio di Torino Giardini Reali nel periodo 1990-2019 e nei due sotto-periodi 1990-2000 e 2001-2019.

Anche utilizzando i dati del periodo estivo (JJA), si osserva un aumento della temperatura del ciclo giornaliero nelle ore diurne, e più significativo se si considerano i dati degli ultimi 20 anni rispetto ai dieci anni precedenti (Figura 13).

Per quanto riguarda il periodo invernale, invece, le temperature medie delle prime ore e delle ultime ore della giornata risultano più basse negli ultimi 20 anni rispetto al decennio precedente (Figura 14).

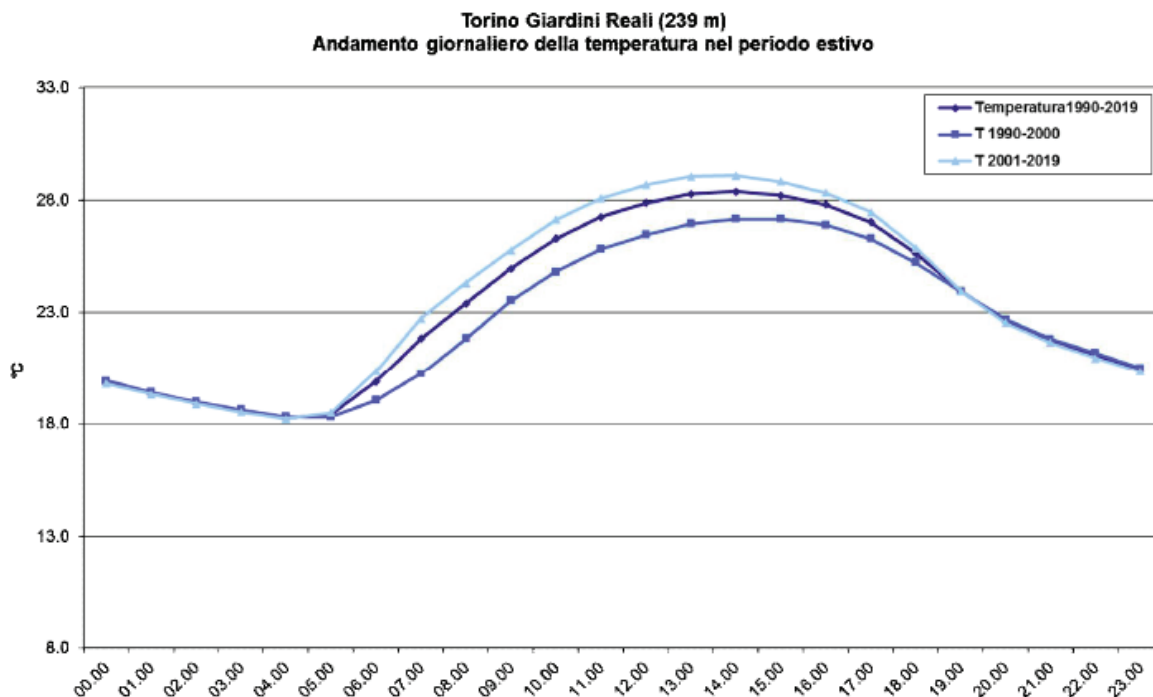


Figura 13 Ciclo diurno della temperatura per la stazione di monitoraggio di Torino Giardini Reali nel periodo 1990-2019 e nei due sotto-periodi 1990-2000 e 2001-2019 (periodo estivo).

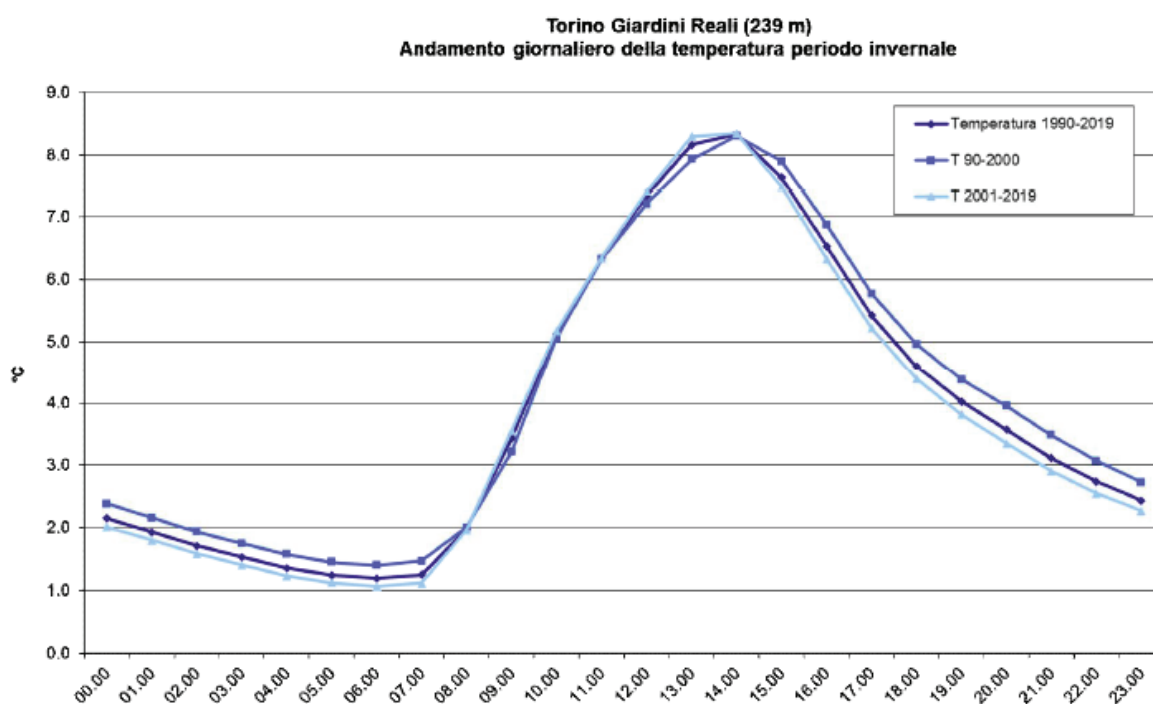


Figura 14 Ciclo diurno della temperatura per la stazione di monitoraggio di Torino Giardini Reali nel periodo 1990-2019 e nei due sotto-periodi 1990-2000 e 2001-2019 (periodo invernale).

2.1.5 Notti tropicali

L'indicatore "notti tropicali" esprime il numero di giorni con temperatura minima dell'aria maggiore di 20°C. Questo indice denota condizioni di disagio nelle ore notturne ed è significativo per valutare gli eventi termici estremi e la presenza di eventuali tendenze significative. Se si considerano le notti tropicali del periodo estivo (giugno-luglio-agosto) della città di Torino, nell'ultimo quindicennio spiccano anni come il 2015 e il 2017 (24 notti tropicali) e il 2019 (27 notti tropicali). Nel decennio precedente si evidenziano il 2003 con 50 notti tropicali, il 1994 con 30 notti tropicali e il 1998 con 25 notti tropicali, (Figura 15). Le notti tropicali medie dell'intero periodo risultano essere 19. Non si evince alcun trend significativo.

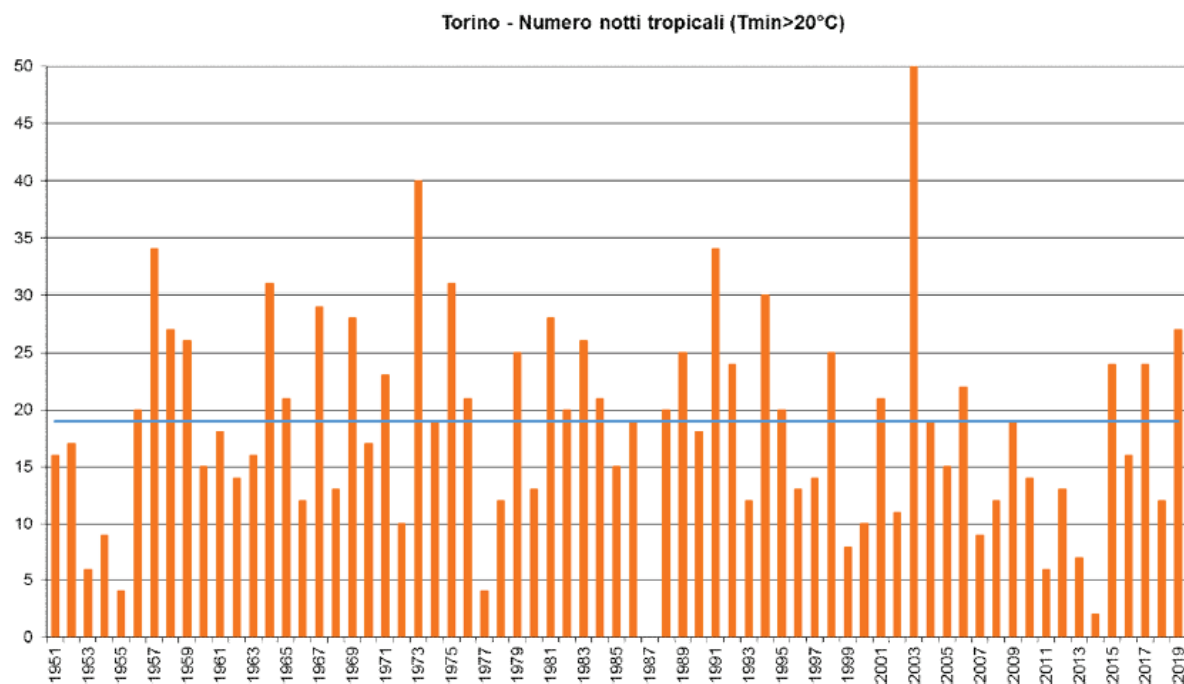


Figura 15 Numero di notti tropicali (temperatura minima>20°C) del periodo estivo della stazione di monitoraggio di Torino nel periodo 1951-2019. In blu il numero medio delle notti tropicali dell'intero periodo.

2.1.6 Giorni di gelo

I “giorni di gelo” rappresentano un indicatore sulle condizioni di rischio meteorologico dovute a basse temperature che si verificano quando la temperatura minima giornaliera è inferiore 0°C (giorni di gelo). Considerando i giorni di gelo calcolati per i mesi da novembre a marzo del periodo 1951-2019 della città di Torino, si osserva una lieve tendenza alla diminuzione, in accordo con le variazioni generali delle temperature dovute al riscaldamento (Figura 16). In particolare, si passa dai 51 giorni nel periodo 1951-1984 ai 47 del periodo 1985-2019.

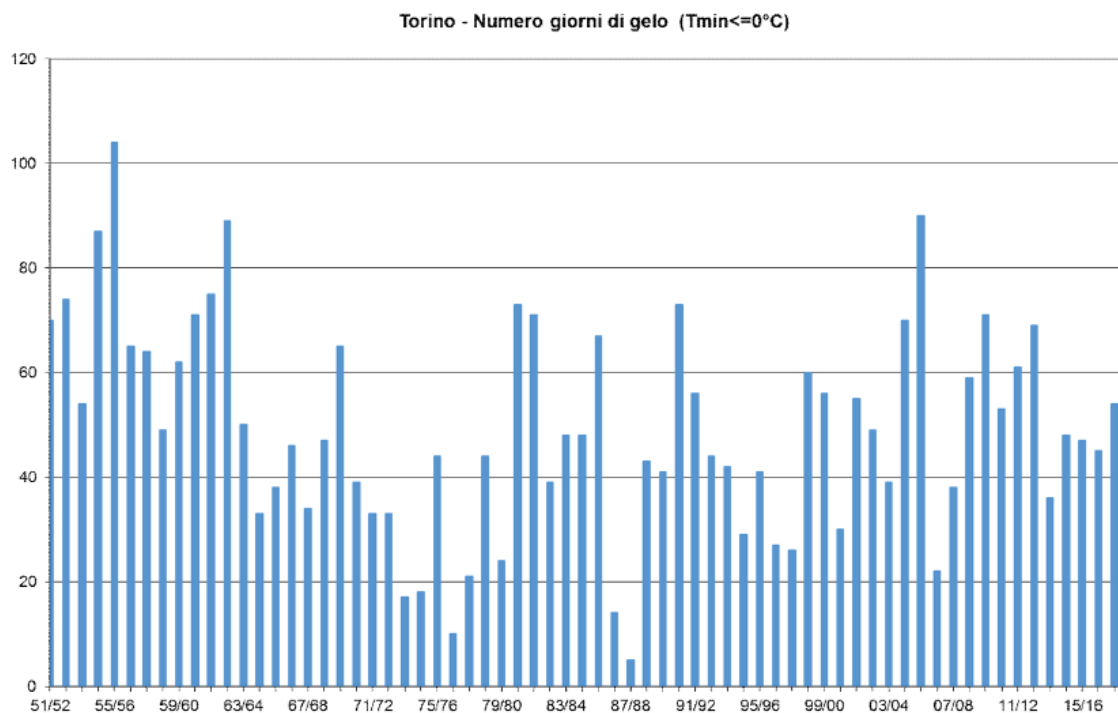


Figura 16 Numero di giorni di gelo (temperatura minima $\leq 0^{\circ}\text{C}$) del periodo novembre-marzo della stazione di monitoraggio di Torino nel periodo 1951-2019.

2.2 Precipitazioni

2.2.1 Precipitazioni annuali

L'analisi delle anomalie di precipitazione cumulata media annua su Torino calcolate a partire dal 1951 fino al 2019 rispetto al periodo 1971-2000 non delinea una tendenza chiara e statisticamente significativa, piuttosto si osservano periodi di più anni consecutivi al di sotto della norma di riferimento, alternati ad altri in cui l'apporto di precipitazione, nel corso dell'annata, risulta positivo (Figura 17).

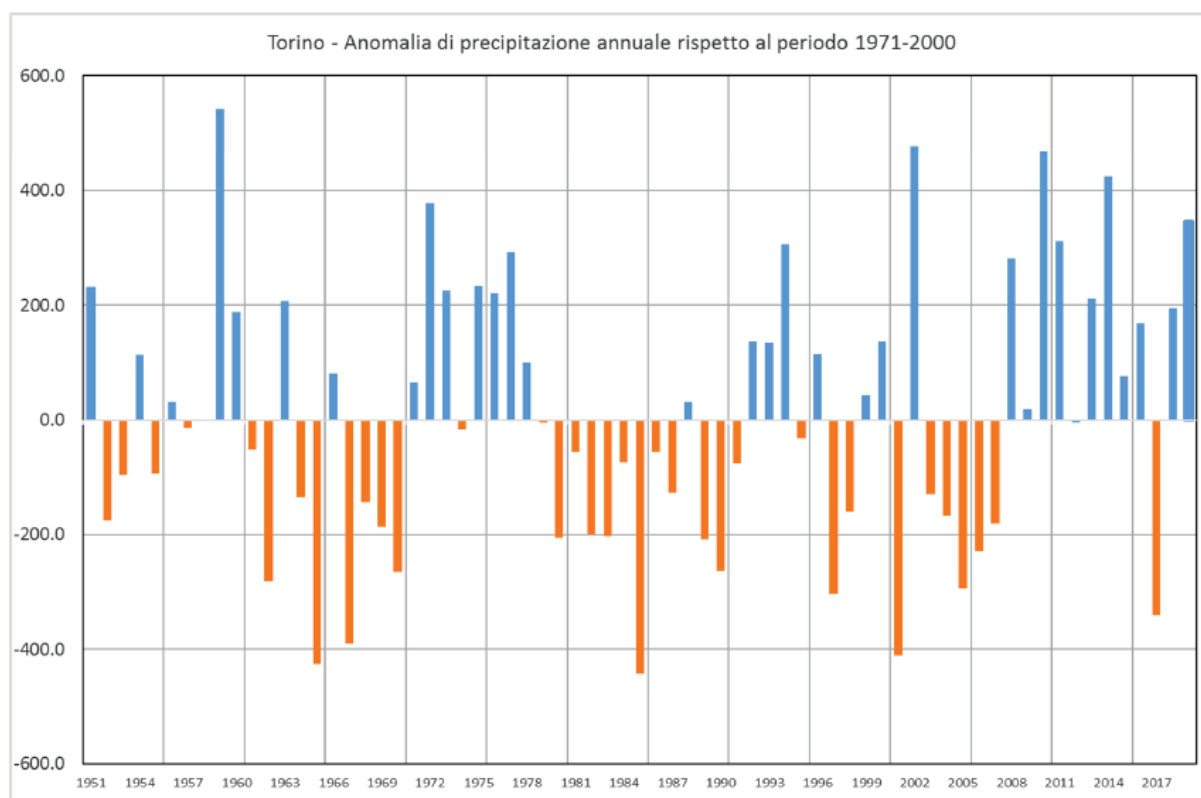


Figura 17 Anomalia della precipitazione media annuale dal 1951 al 2019 rispetto al periodo di riferimento 1971-2000. In arancione gli anni con anomalie negative (anni meno piovosi) in azzurro le anomalie positive (anni più piovosi rispetto al periodo di riferimento).

Dall'analisi effettuata non si evince neanche un aumento della variabilità inter-annuale. Gli ultimi anni, ad eccezione del 2017, vedono un'anomalia positiva della precipitazione annuale.

2.2.2 Precipitazioni stagionali

Anche l'analisi delle precipitazioni stagionali dal 1951 al 2019 non mostra una netta tendenza all'aumento o alla diminuzione: nello specifico a partire dal 2000 sembrano essere predominanti gli anni meno piovosi (anomalie negative in arancione) tranne che nel periodo autunnale dove sono maggiori gli anni caratterizzati da un'anomalia positiva (anomalie positive in blu, Figura 18).

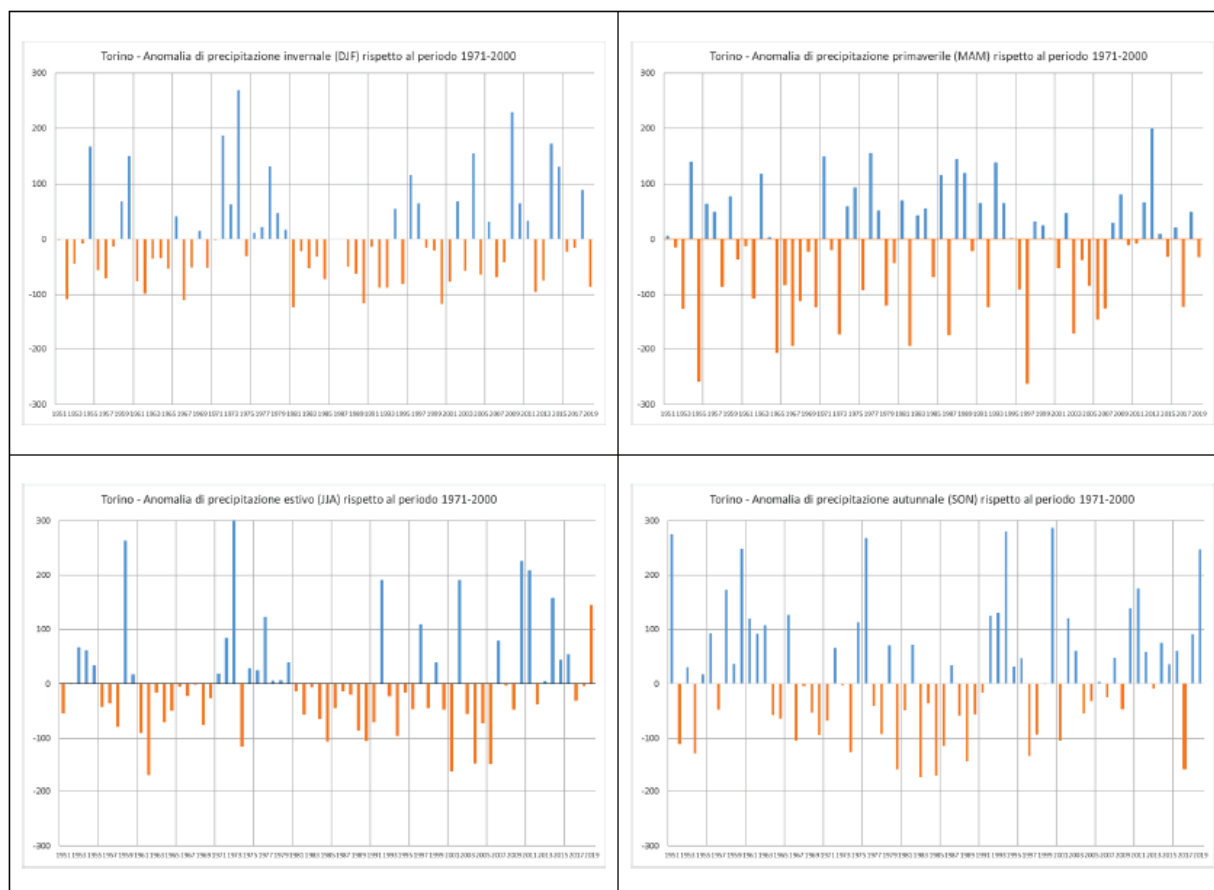


Figura 18 Anomalia delle precipitazioni invernali (in alto a sinistra), primaverili (in alto a destra), estive (in basso a sinistra) e autunnali (in basso a destra) relative alla stazione di Torino nel periodo 1951-2019 rispetto alla media del periodo 1971-2000 (in blu gli anni al di sopra della media, in arancione quelli al di sotto della media 1971-2000).

Osservando il periodo estivo e autunnale, si evidenziano gli anni relativamente più asciutti. In particolare, nella seconda metà degli anni '80 e nei primi anni 2000, il Piemonte si è trovato a dover affrontare più annate consecutive di scarse piogge, mentre a fine anni '70 e negli ultimi anni, ad eccezione del 2015, la situazione è opposta.

Se si considera il ciclo annuale della pioggia si può notare che i mesi più piovosi dell'anno sono maggio e novembre nell'ultimo quindicennio, mentre nel periodo 1951-1989 e nell'intero periodo (1951-2019) i mesi più piovosi si concentrano nei mesi primaverili (aprile e maggio) e all'inizio dell'estate (giugno). Il mese meno piovoso è gennaio in tutti i periodi considerati (Figura 19). Il mese autunnale più piovoso, se era ottobre nel periodo 1951-1989, diventa novembre negli ultimi 15 anni.

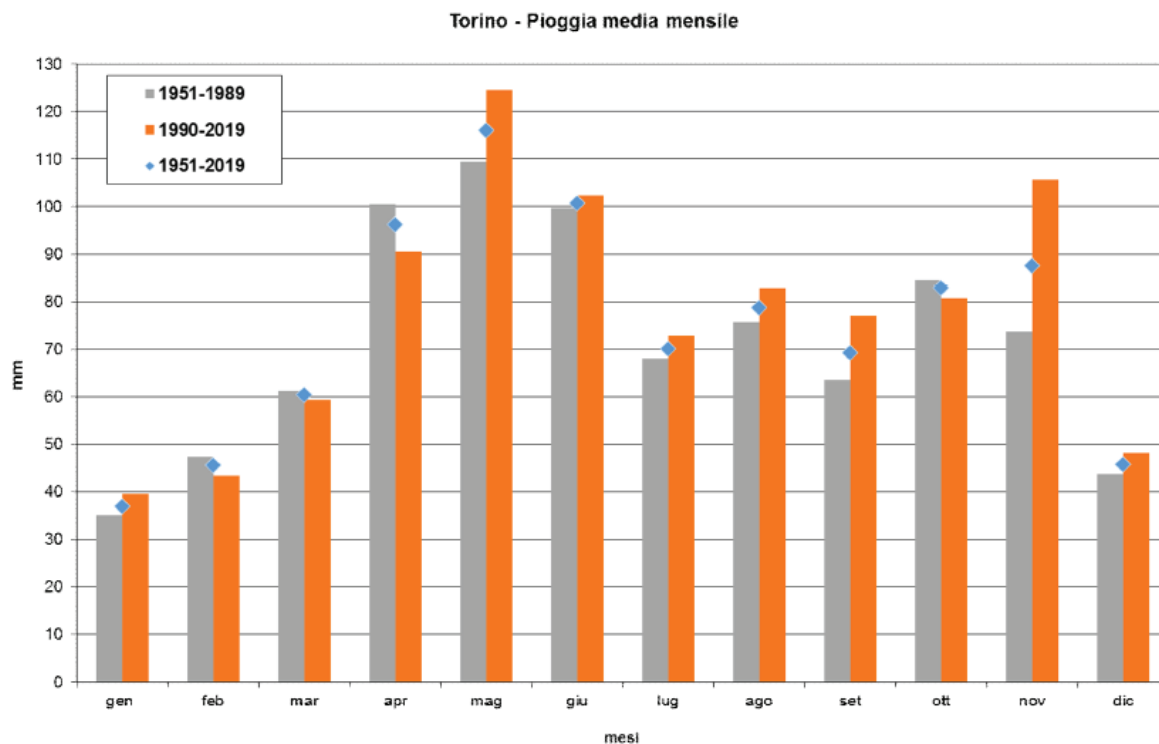


Figura 19 Andamento della precipitazione media mensile dei periodi 1951-1989 (in grigio) e 1990-2019 (in arancione) confrontati con l'intero periodo 1951-2019 (rombo azzurro).

Considerando i mesi di maggio e novembre, i mesi più piovosi dell'anno dal 1990 ad oggi, l'analisi della tendenza della precipitazione cumulata mensile, positiva per entrambi i mesi, mostra un aumento maggiore nel mese maggio di piuttosto che in quello di novembre (Figura 20).

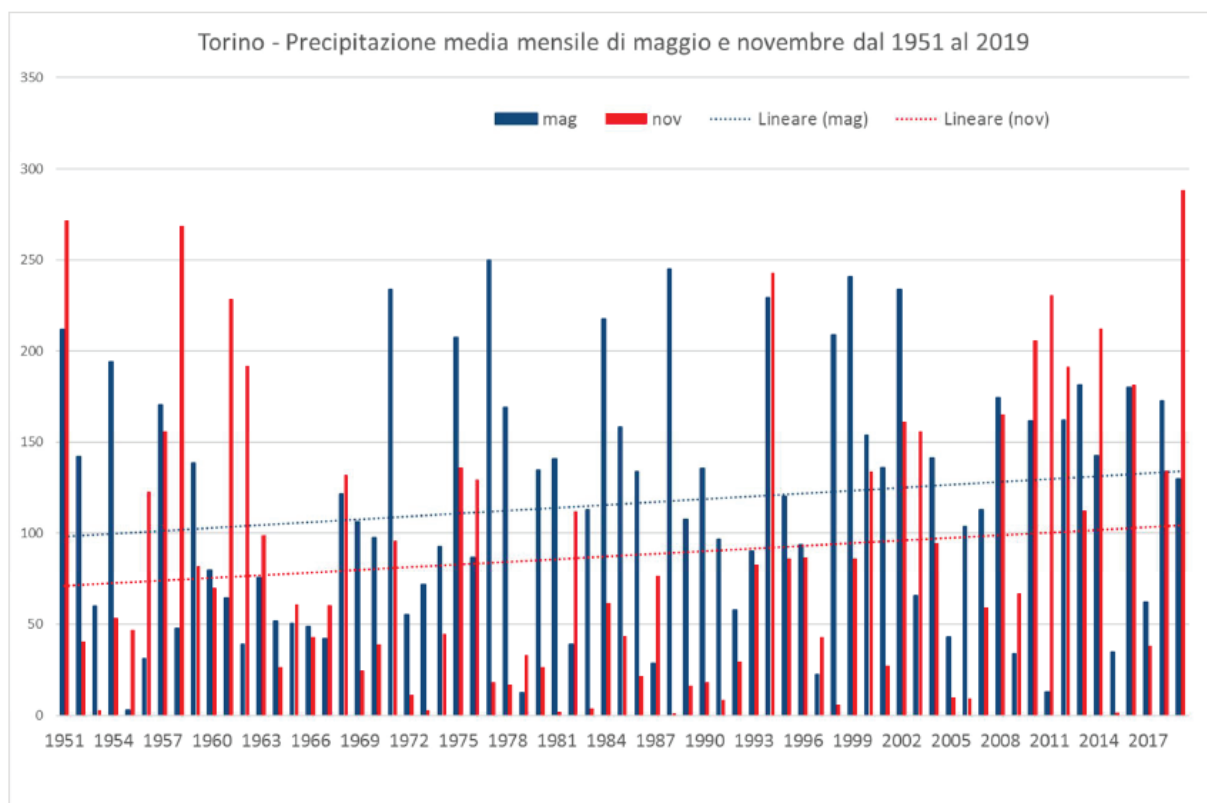


Figura 20 Precipitazione cumulata mensile dei mesi di maggio (in blu) e di novembre (rosso) dal 1951 al 2019. Tratteggiate le tendenze lineari.

L'aumento negli ultimi 15 anni della precipitazione di novembre (in media da 72 mm a 109 mm), si può attribuire ai numerosi eventi alluvionali che hanno colpito il Piemonte, più che a una tendenza graduale (Figura 21).

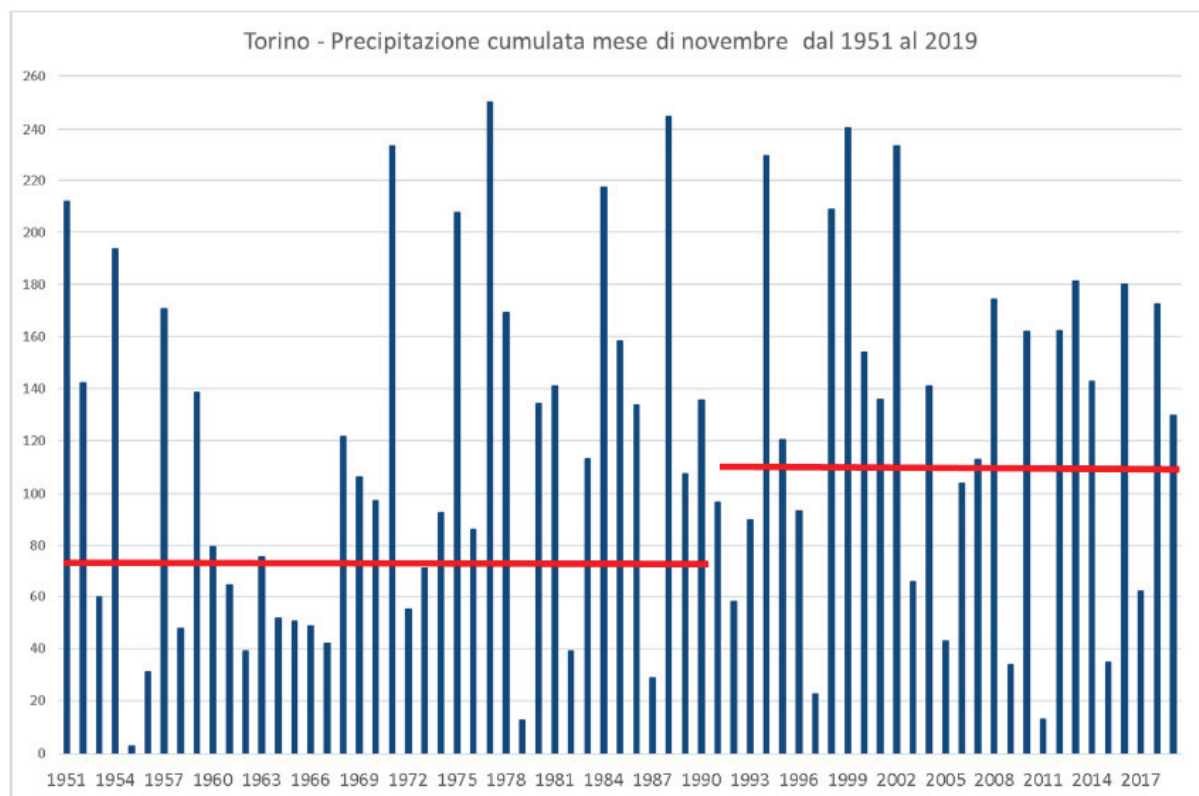


Figura 21 Precipitazione cumulata mensile dei mesi di novembre (in blu) e medie dei periodi dal 1951 al 1990 e dal 1991 al 2019 (linee rosse).

2.2.3 Numero di giorni piovosi

Per ciascun anno dal 1951 al 2016 è stato calcolato il numero di giorni piovosi, utilizzando però diverse soglie pluviometriche: 1 mm, 5 mm, 10 mm e 20 mm al giorno, in modo da avere un quadro anche in relazione alle piogge più intense (Figura 22).

L'anno con il più basso numero di giorni piovosi risulta il 1985 con 48 giorni piovosi ($P \geq 1\text{mm}$), seguito dal 1962 con 53 giorni piovosi e dal 1997 con 51 giorni piovosi. L'anno con il maggior numero di giorni piovosi è il 1972. Dall'analisi della serie dei dati si osserva una lieve tendenza (anche se non statisticamente significativa) alla diminuzione del numero dei giorni piovosi ($P \geq 1\text{ mm}$ e $P \geq 5\text{ mm}$) e a un lieve aumento (anche questo non statisticamente significativo) delle precipitazioni con soglia superiore a 10 mm e a 20 mm.

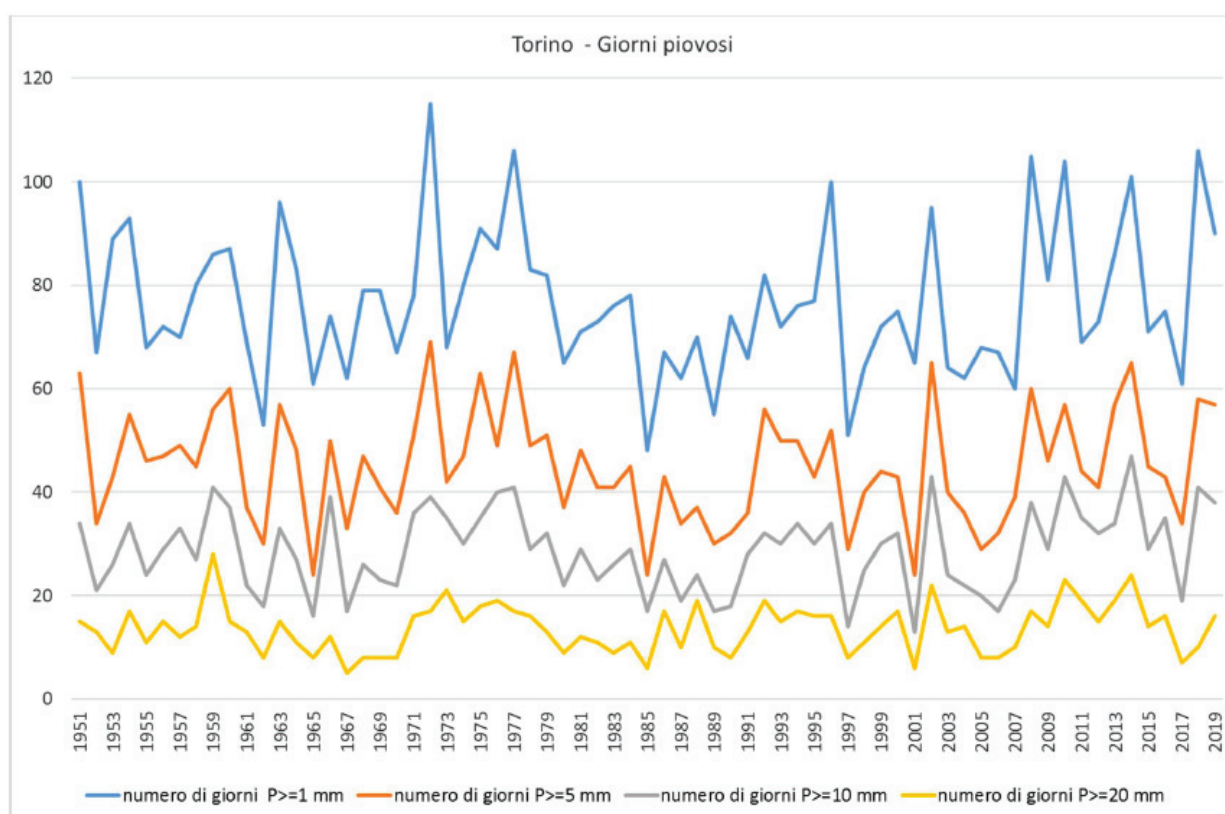


Figura 22 Numero di giorni piovosi dal 1951 al 2019 per le soglie di $P \geq 1\text{mm}$ (in blu), $P \geq 5\text{ mm}$ (in arancione), $P \geq 10\text{ mm}$ (in grigio) e $P \geq 20\text{ mm}$ (in giallo).

Le stesse considerazioni sono supportate dalle informazioni fornite dal grafico di Figura 23, che rappresenta la distribuzione del numero di giorni piovosi nelle diverse classi di precipitazione: nel periodo 1984-2019, rispetto al periodo 1951-1983, sembrano aumentare le precipitazioni di intensità da moderata a forte, a discapito delle precipitazioni deboli.

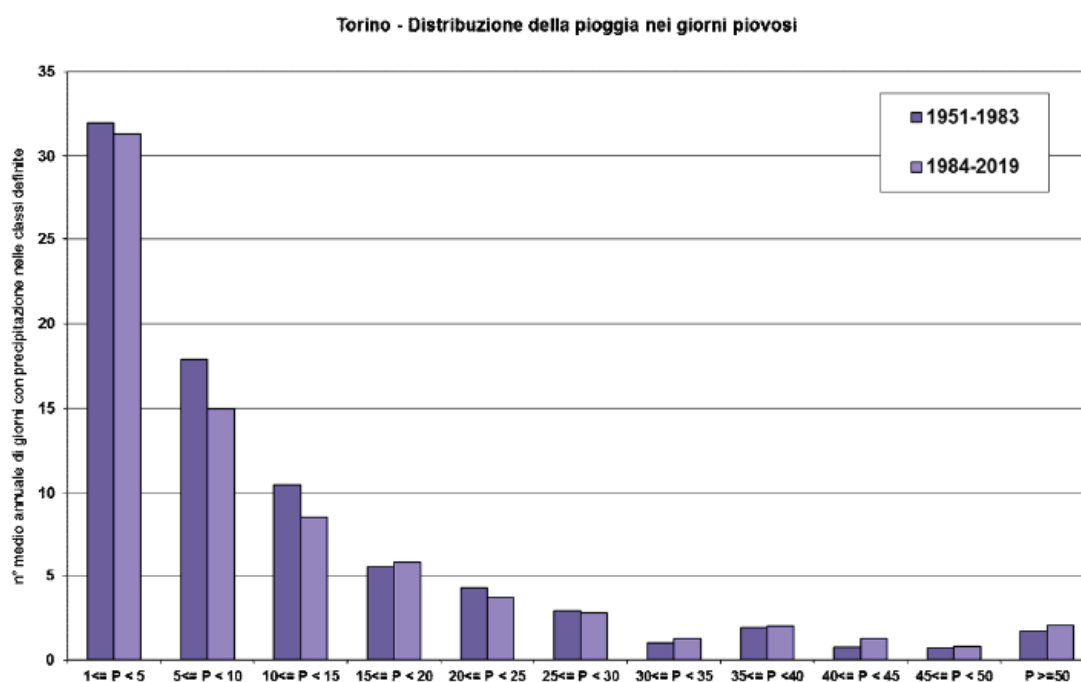


Figura 23 Distribuzione della pioggia nei giorni piovosi per i periodi 1951-1983 e 1984-2019.

Considerando l'ultimo periodo di circa trenta anni della serie, 1984-2016, rispetto al trentennio precedente, si osserva un aumento della precipitazione media annuale, una diminuzione del numero di giorni piovosi (precipitazione registrata maggiore o uguale a 1mm), con un lieve aumento dell'intensità di precipitazione (ossia i mm di pioggia al giorno).

Anni	Precipitazione totale media annuale (mm)	Numero giorni piovosi medio annuale	Intensità di precipitazione media (mm/gg)
1951-1983	883,7	79,1	11,1
1984-2019	895,5 ▲	74,6 ▼	11,9

2.2.4 Precipitazioni intense

Dal punto di vista delle precipitazioni intense, confrontando i percentili più elevati (95° e 99°) della distribuzione della pioggia giornaliera dal 1951 al 2019, si osserva una lieve tendenza all'aumento dei valori estremi più marcata per il 99° percentile (Figura 24).

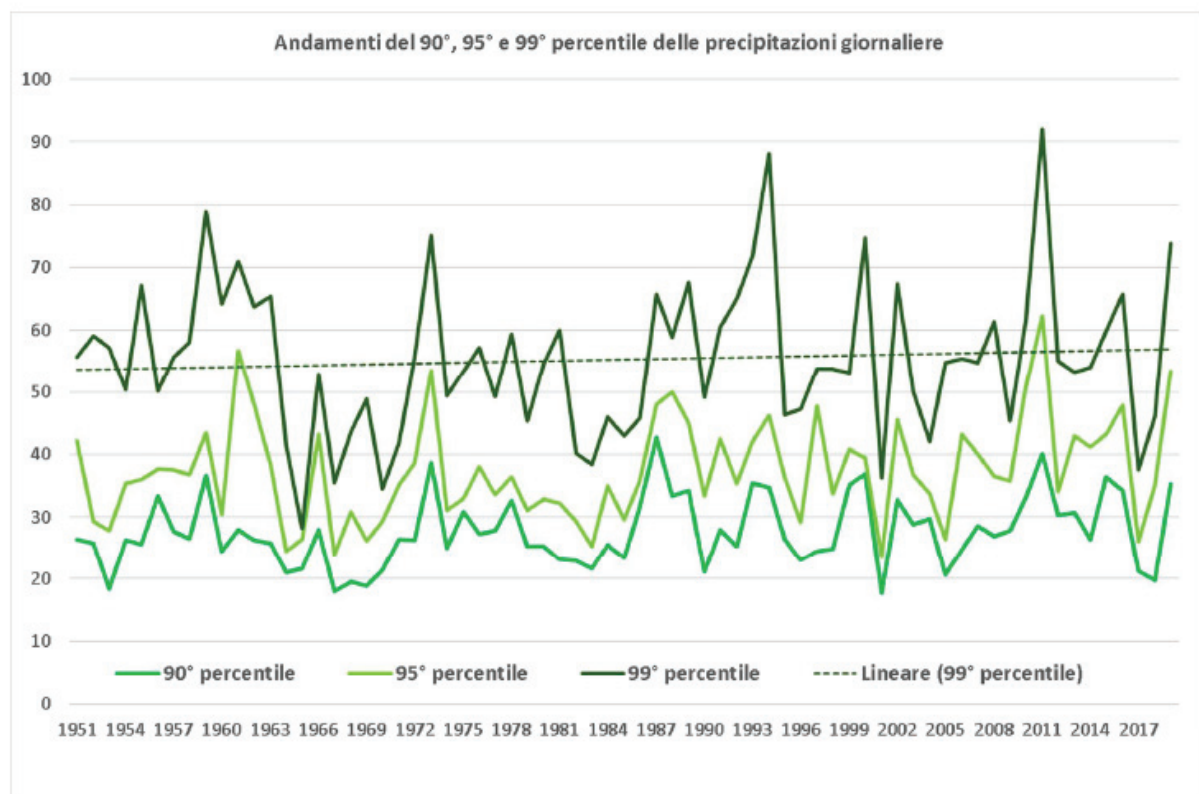


Figura 24 Andamento del 90°, del 95° e del 99° percentile delle precipitazioni giornaliere registrate a Torino dal 1951 al 2019.

Il valore maggiore del 95° è pari a 62.2 mm, mentre per il 99° il valore maggiore è pari a 91.96 mm. Entrambi si registrano nel 2011. Nelle tabelle sottostanti sono riportati i valori del 90°, 95° e del 99° percentile dei periodi 1971-2000 e 2001-2019, al fine di confrontare gli ultimi 20 anni con il periodo climatico di riferimento, e il periodo 1957-1986 e 1987-2019, per evidenziare le caratteristiche dei due trentenni.

	1971-2000	2001-2019
90° percentile	28.7	28.7
95° percentile	37.3	39.9
99° percentile	55.7	56.1

	1957-1986	1987-2019
90° percentile	25.1	29.4
95° percentile	34.9	40.2
99° percentile	51.9	58.3

Per analizzare le eventuali variazioni nelle precipitazioni più intense, sono state considerate le distribuzioni annuali delle precipitazioni orarie (superiori o uguali ad 1 mm) registrate a Torino dal 1990 al 2019 (Figura 25).

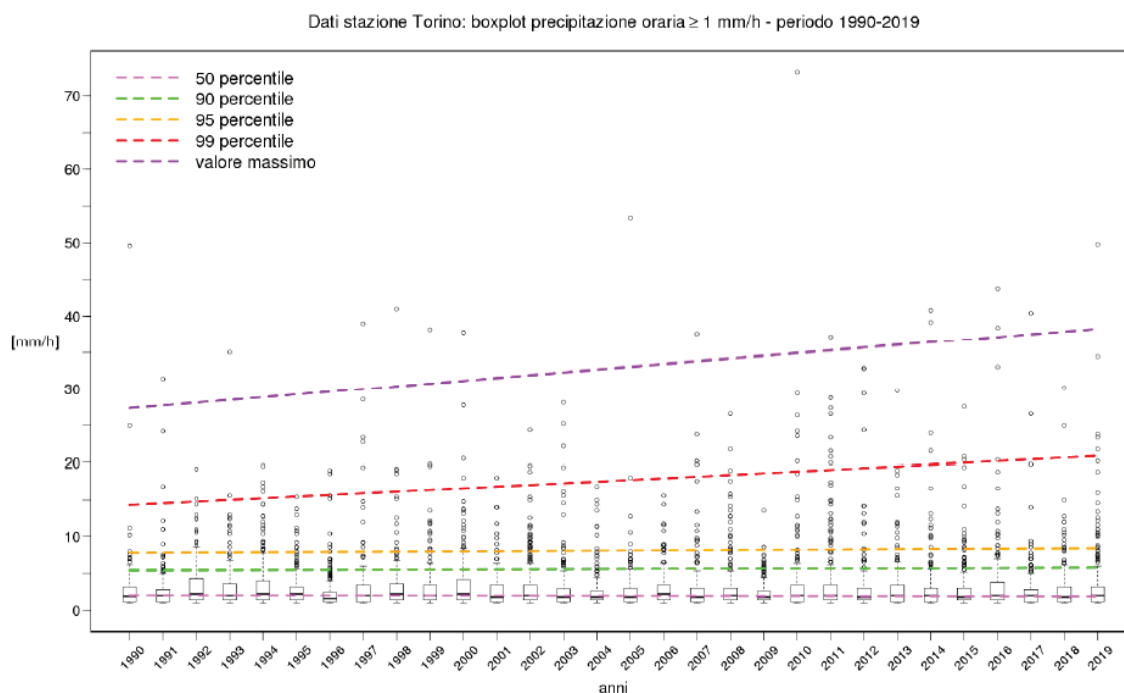


Figura 25 Distribuzioni delle precipitazioni orarie (≥ 1 mm) dal 1990 al 2019. Le linee corrispondono agli andamenti dei percentili: viola chiaro 50° percentile, verde 90° percentile, giallo 95° percentile, rosso 99° percentile, viola valore massimo.

Si evidenzia un lieve aumento dei massimi orari e del 99° percentile, anche se il trend positivo risulta statisticamente non significativo, nessun trend si evidenzia invece per i percentili più bassi. Per evidenziare una eventuale dipendenza stagionale nell'aumento dei massimi i medesimi boxplot sono rappresentati per le precipitazioni orarie nelle stagioni meteorologiche: dicembre-gennaio-febbraio, marzo aprile-maggio, giugno-luglio-agosto, settembre-ottobre-novembre (Figura 26).

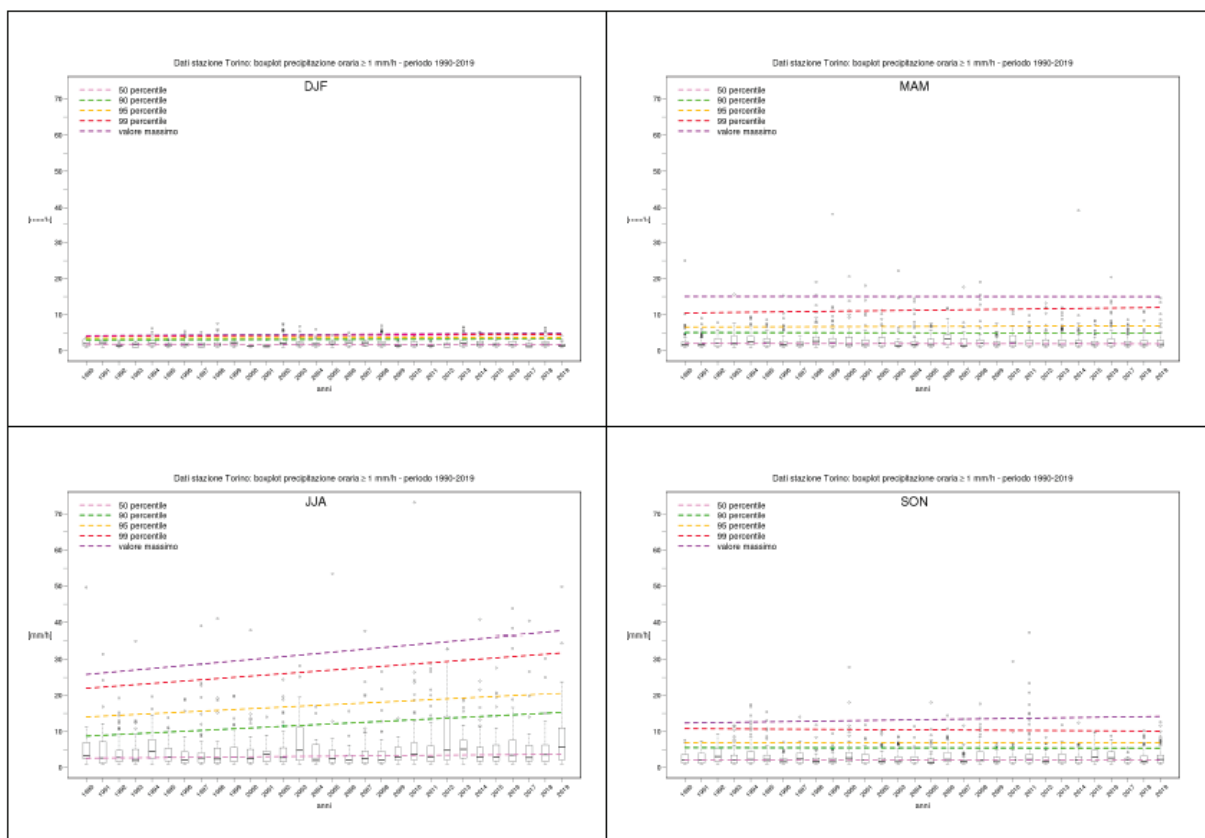


Figura 26 Distribuzioni delle precipitazioni orarie ($\geq 1\text{mm}$) dal 1990 al 2019 nelle stagioni dicembre-gennaio-febbraio in alto a sinistra, marzo-aprile-maggio in alto a destra, giugno-luglio-agosto in basso a sinistra, settembre-ottobre-novembre in basso a destra. Le linee corrispondono agli andamenti dei percentili: viola chiaro 50° percentile, verde 90° percentile, giallo 95° percentile, rosso 99° percentile, viola valore massimo.

Anche considerando le diverse stagioni (Figura 26), si evidenzia una tendenza all'aumento dei valori massimi e del 99° percentile, aumento che non risulta però significativo dal punto di vista statistico. Le stagioni dove l'aumento è maggiore sono l'estate e l'autunno, caratterizzate dalla presenza di fenomeni convettivi, favoriti da un'atmosfera più calda. Nel periodo autunnale si evidenziano gli anni caratterizzati dagli eventi alluvionali, anche con caratteristiche differenti (1994, 2000, 2011), senza una tendenza nella variabilità. Anche l'andamento del massimo e dei percentili più elevati delle precipitazioni orarie (Figura 27) mostrano una tendenza all'aumento negli anni, pur mantenendo una grande variabilità.

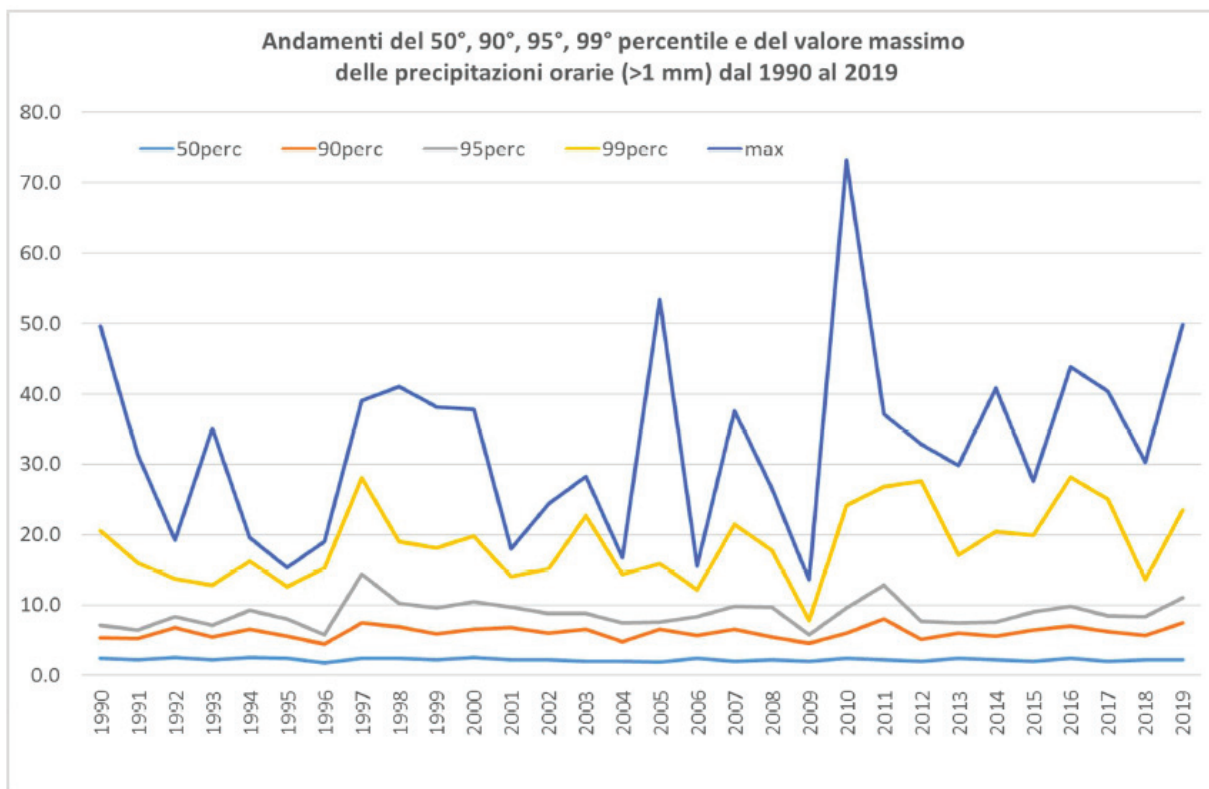
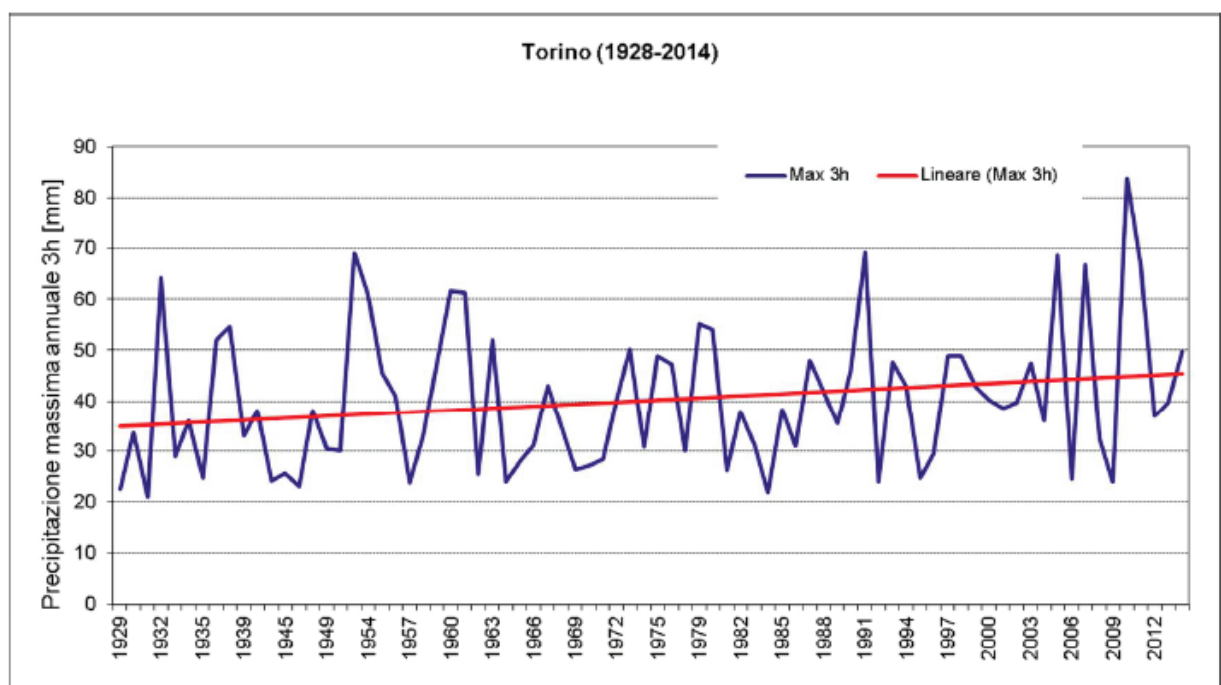
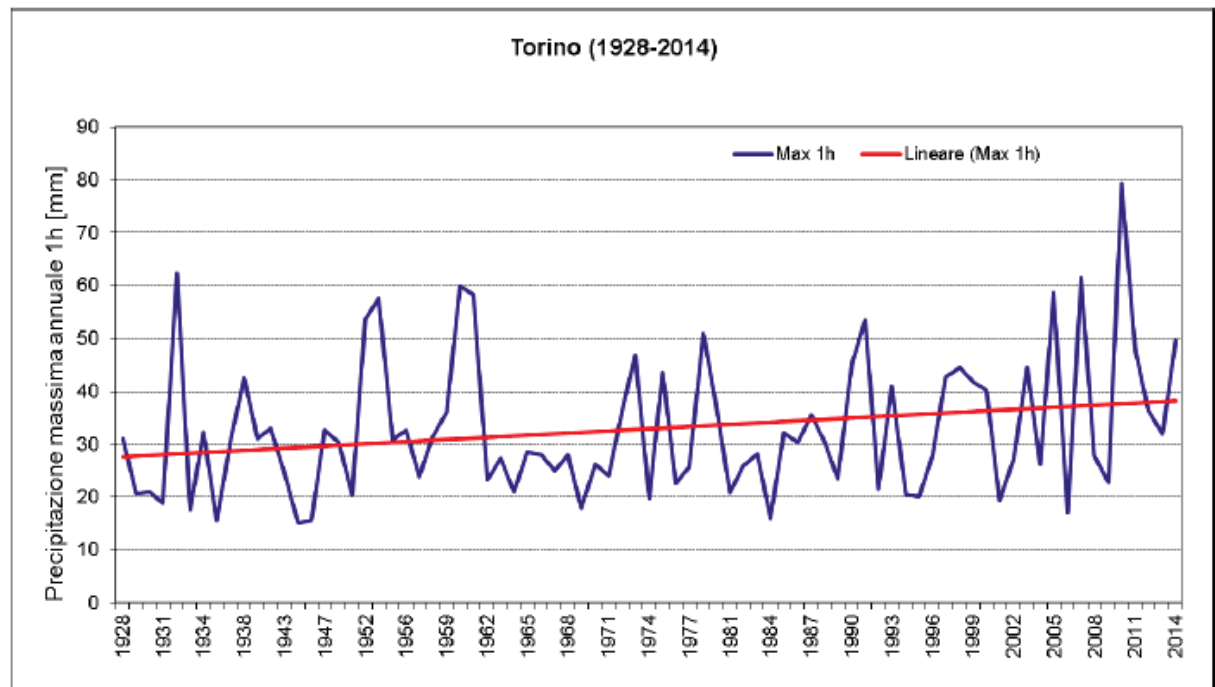


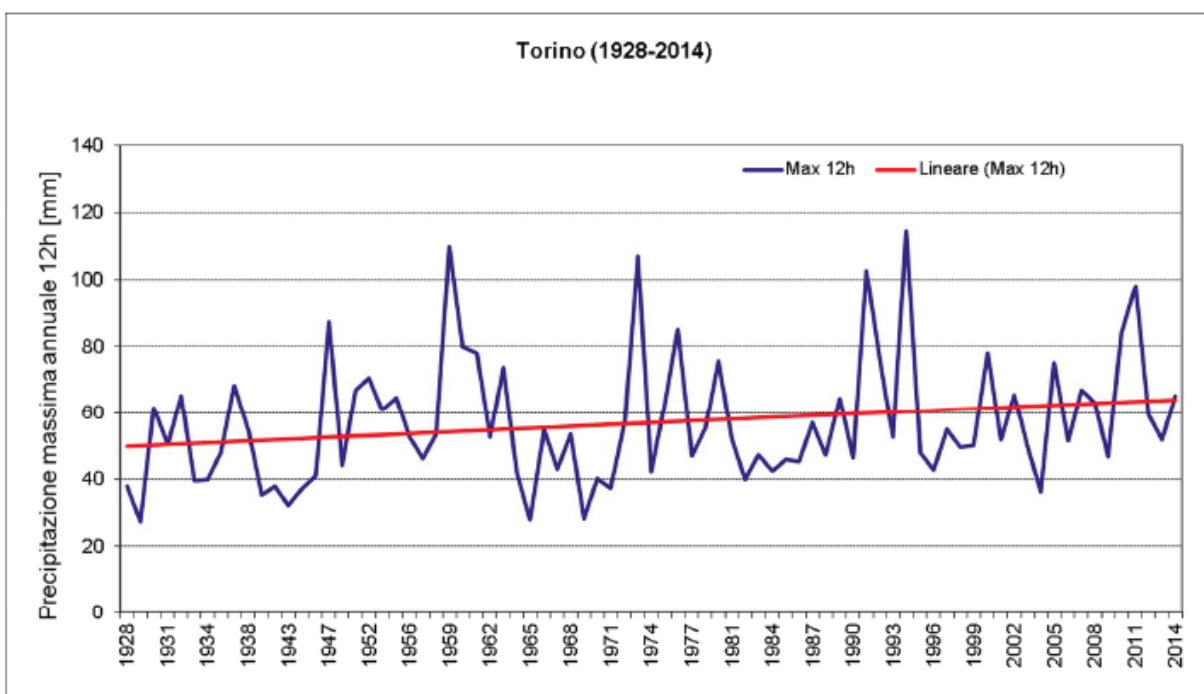
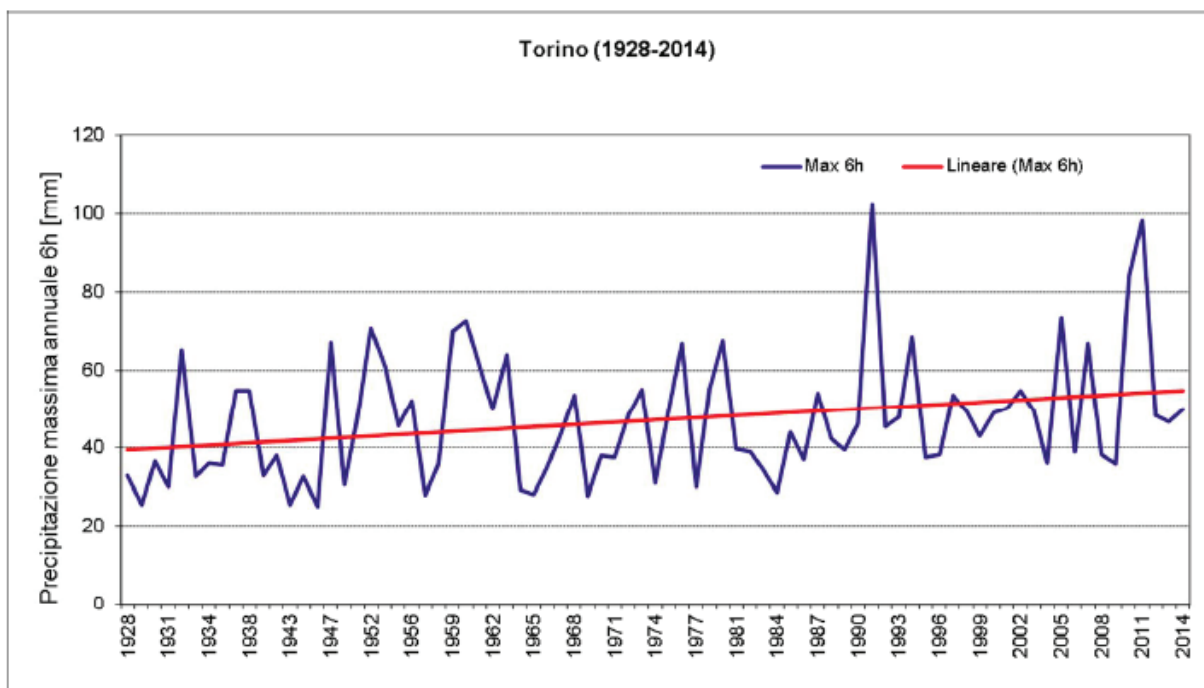
Figura 27 Andamento del valore massimo e dei percentili: 50°, 90°, 95° e 99° delle precipitazioni orarie (≥ 1 mm) dal 1990 al 2019.

Dai dati osservati non si può quindi affermare con certezza che le precipitazioni intense di breve durata sulla città di Torino siano aumentate, sebbene la stagione estiva e quella autunnale sembrano evidenziare una tendenza all'aumento.

Sempre nell'ambito delle precipitazioni intense, sono stati analizzati anche i massimi annuali di diversa durata (1h, 3h, 6h, 12h e 24h) relativi alla città di Torino per il periodo 1928-2014. Nella Figura 28 si riporta il loro andamento e i rispettivi trend.

Per tutte le durate temporali si evidenzia un trend significativo dell'ordine del 2-3% ogni 10 anni.





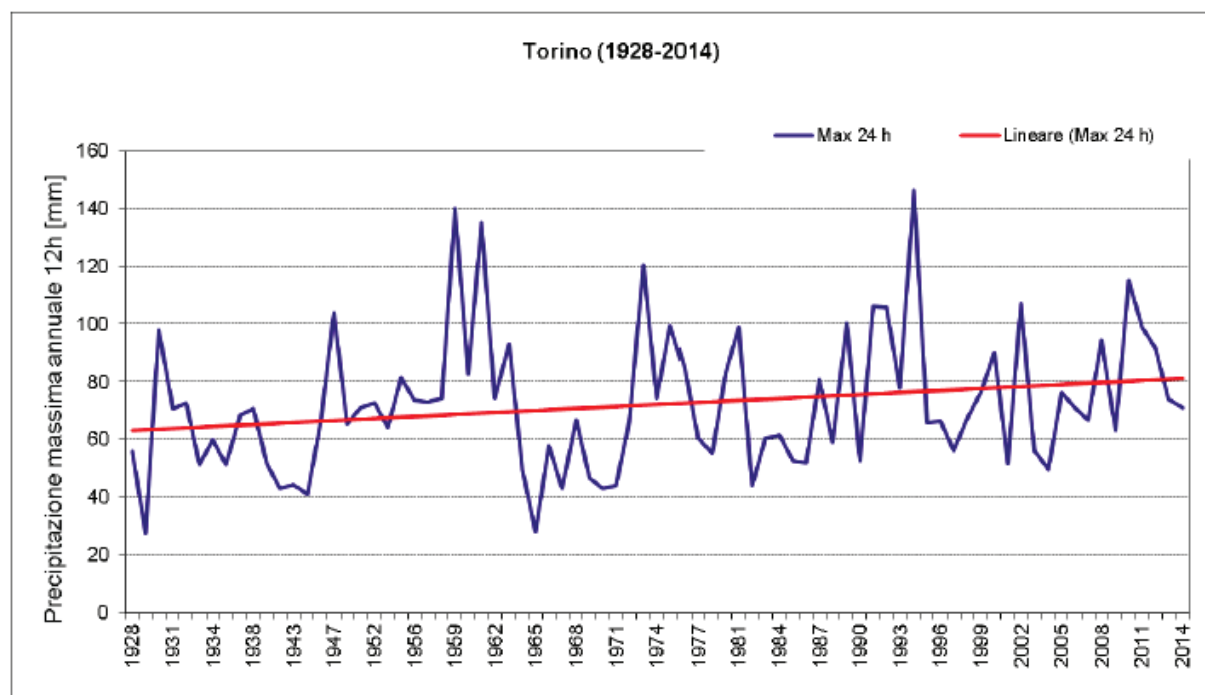


Figura 28 Massimi annuali di precipitazione da 1 a 24 ore e relativo trend.

Anche l'intensità di precipitazione sub-oraria (10, 15 e 30 minuti) in occasione di eventi temporaleschi, sta facendo registrare valori massimi che fino ad oggi erano attribuibili ad intervalli orari (dell'ordine di 35mm in 30 minuti e 20mm in 10 minuti). Senza poter evidenziare dei trend, che per fenomeni così intensi e rari nella distribuzione complessiva delle piogge è pressoché impossibile, si ritiene che tali valori possano determinare effetti non completamente noti sul tessuto urbano della città. Il loro monitoraggio in stretta relazione agli effetti determinati, è di fondamentale importanza per definire misure di adattamento.

2.3 Portate

L'analisi idrologica del Po è stata condotta sulla base dei dati registrati nella stazione idrometrica di Torino, per la quale è stata calcolata la portata media mensile.

Per l'analisi dei trend di lungo periodo delle portate del fiume Po, sono stati utilizzati i dati della stazione di Moncalieri-Meirano dal 1935 al 1990 gestita dal Servizio Idrografico e Mareografico Nazionale, e dal 1995 al 2018 i dati della stazione di Torino Murazzi, appartenente alla rete di monitoraggio automatico di Arpa Piemonte. In linea generale dall'analisi di tali dati, si può affermare che il regime idrologico è caratterizzato da portate minori in estate-inverno e maggiori in autunno-primavera.

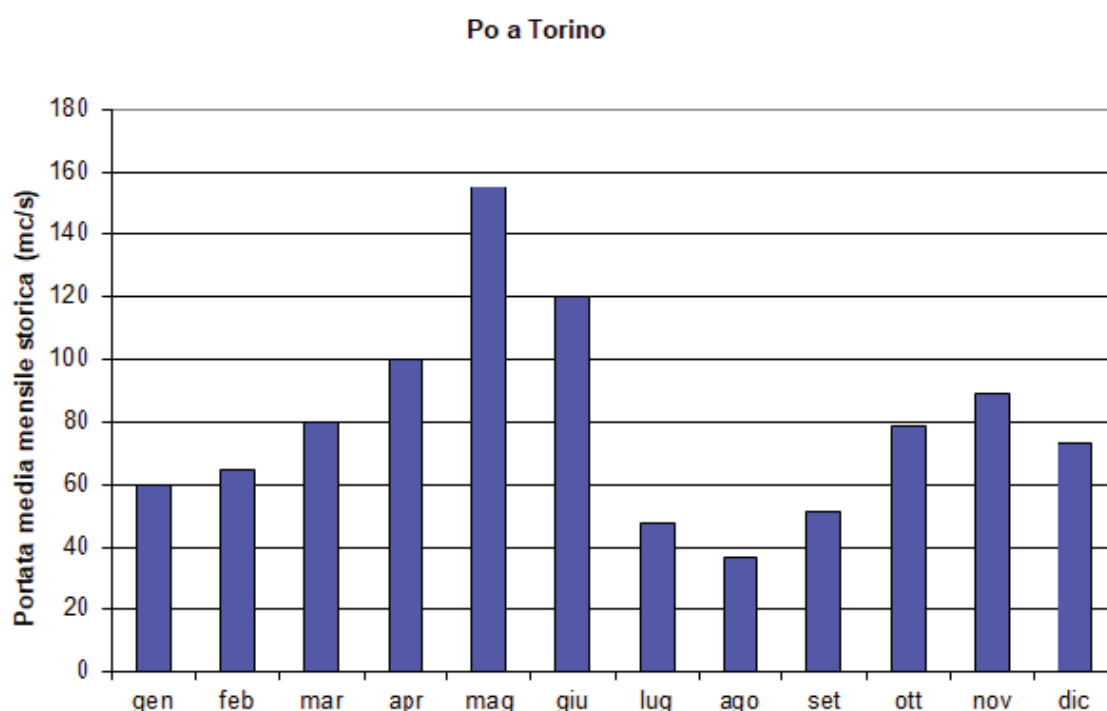


Figura 29 Andamento delle portate medie mensili del Po a Torino dal 1935 al 2018.

Per quanto riguarda i periodi a portate minori, l'estate è caratterizzata da una portata alimentata principalmente dalle precipitazioni e che risente dei prelievi dovuti ad estati siccitose, mentre la portata invernale dalle precipitazioni liquide nella parte bassa del bacino e poco dalla fusione nivale. Nel periodo primaverile le portate sono determinate soprattutto dal contributo della fusione nivale e in quello autunnale prevalentemente dalle precipitazioni.

Per evidenziare un'eventuale modifica nel ciclo idrologico, è stata divisa in due quarantenni la serie 1935-2018 (Figura 30) e valutati i due istogrammi relativi.

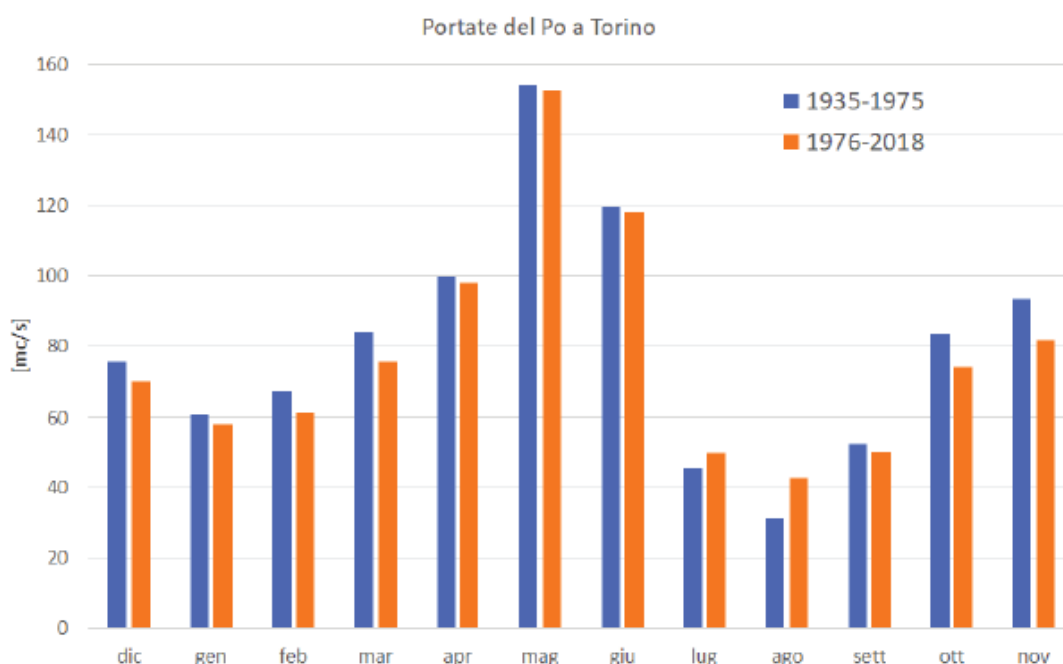


Figura 30 Andamento delle portate medie mensili del Po a Torino nei periodi 1935-1975 e 1976-2018.

La suddivisione non mostra una sostanziale variazione del ciclo idrologico, ma evidenzia una lieve diminuzione delle portate soprattutto nei mesi autunnali e invernali. Nei due mesi estivi (luglio e agosto) si nota un aumento, anche se minimo, probabilmente dovuto alle nuove norme di rilascio del Deflusso Minimo Vitale imposte a partire dal 2008.

Nella Figura 31 si riporta l'andamento delle portate medie giornaliere per l'intera serie di dati disponibili dove sono evidenti gli eventi alluvionali del 1949, del 2000 e del 2016 in cui la portata giornaliera a Torino ha superato i 2000 mc/sec.

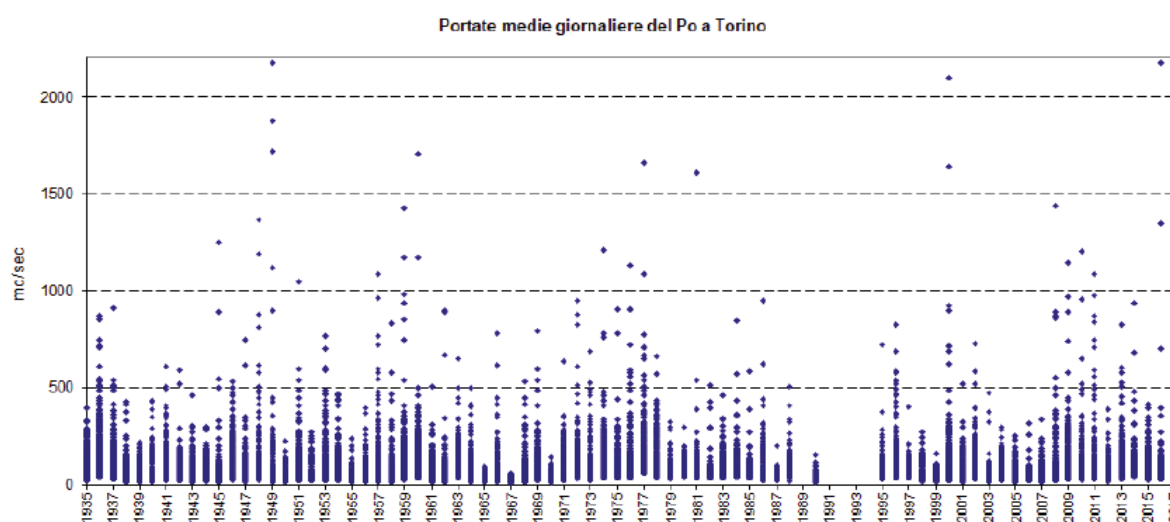


Figura 31 Distribuzione delle portate medie giornaliere del Po a Torino dal 1935 al 2018.

Sono quindi stati calcolati il 10°, 50° e 90° percentile, come riportato nella Figura 32. I valori medi (50° percentile) non sembra avere un trend definito, mentre si osserva una diminuzione dei valori dei percentili più alti delle portate medie giornaliere (90° percentile) e una minima crescita dei valori più bassi (10° percentile).

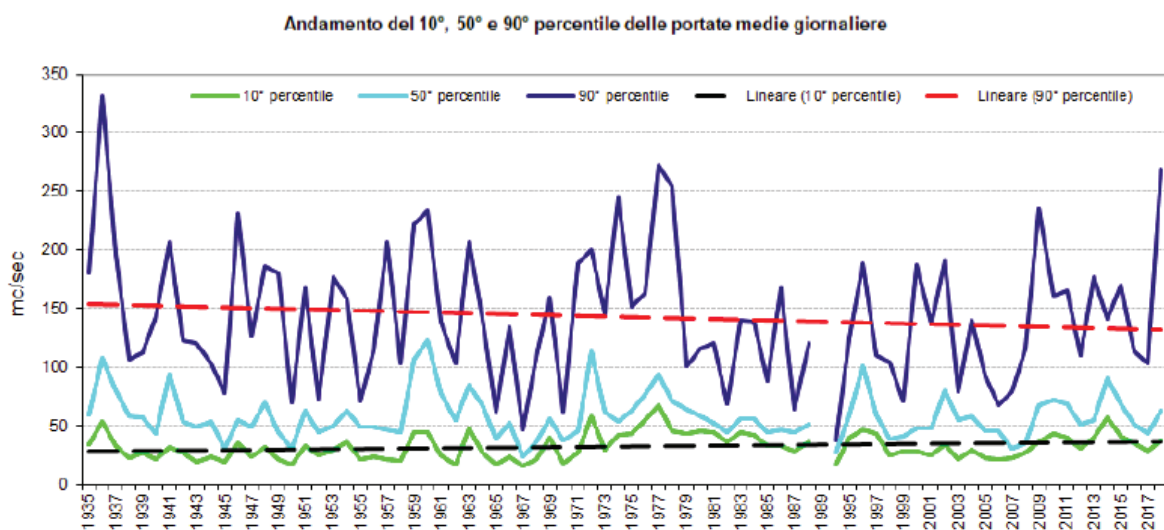
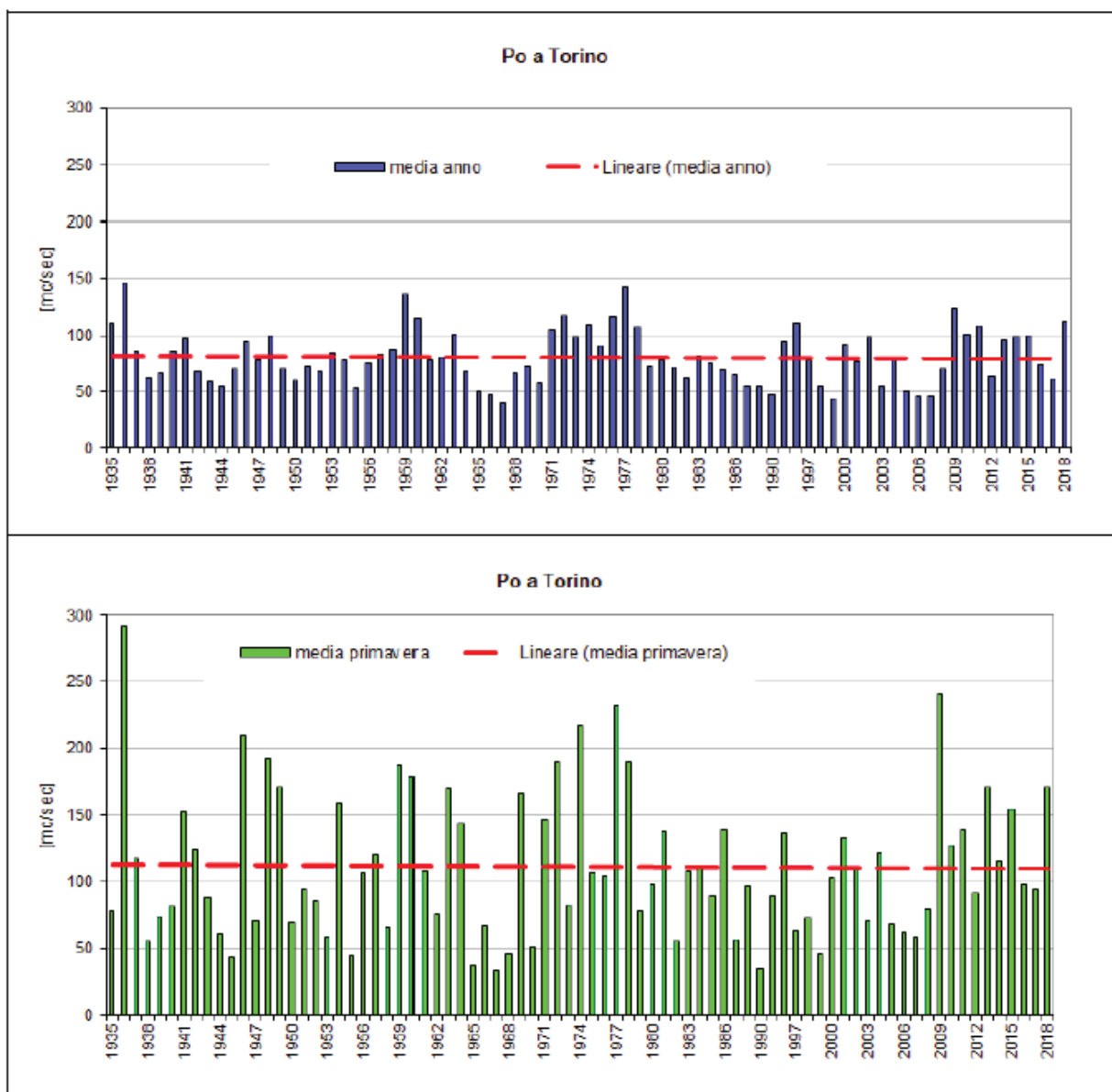
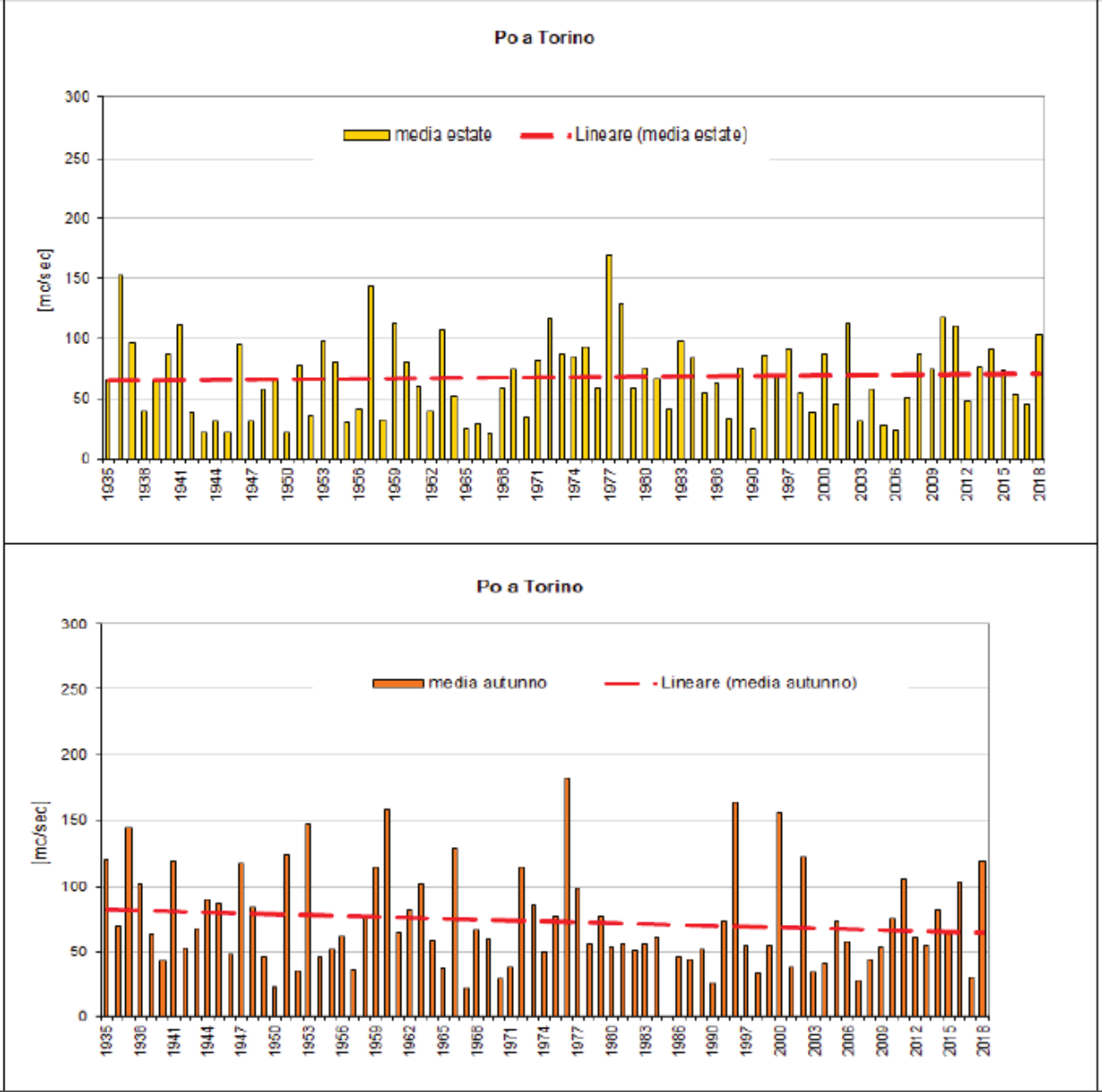


Figura 32 Andamento del 10°, 50° e 90° percentile delle portate medie giornaliere.

Per analizzare più nel dettaglio l'evoluzione sulla disponibilità di risorsa idrica, è stata condotta un'analisi a scala stagionale, al fine di evidenziare la presenza o meno di trend caratteristici. Nel grafico seguente si riportano le portate annuali e stagionali per la stazione del Po a Torino, dove le stagioni sono da intendersi:

- primavera: 1 marzo - 31 maggio;
- estate: 1 giugno - 31 agosto;
- autunno: 1 settembre - 30 novembre;
- inverno: 1 dicembre - 28/29 febbraio





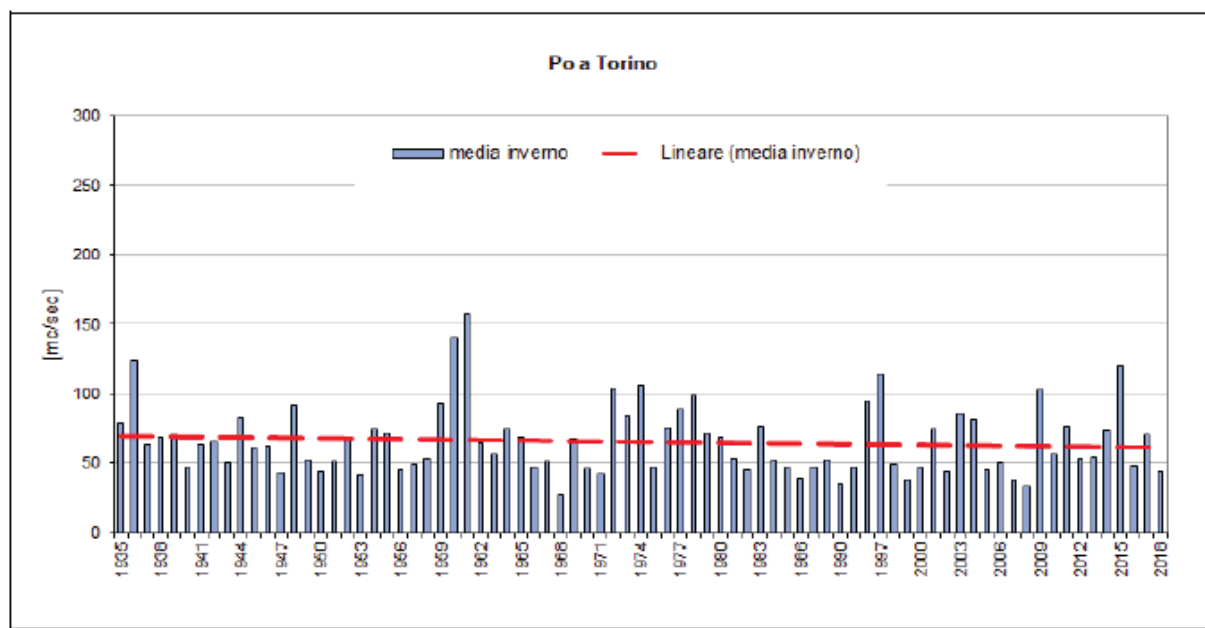


Figura 33 Portate medie annuali e stagionali e relativi trend.

Analizzando i dati stagionali, si nota che le portate annuali e quelle primaverili sono stabili, mentre si evidenzia un trend, anche se minimo, di crescita delle portate medie estive e di diminuzione nei valori autunnali e invernali.

Gli anni in cui si sono registrati portate medie annue maggiori sono il 1936, il 1977 e il 1959, mentre, per quanto riguarda le stagioni statisticamente più piovose in Piemonte, ovvero primavera e autunno, gli anni con i valori più alti sono il 1936 e il 2009 in primavera, e il 1976 e il 1996 in autunno. Le portate medie estive più basse sono state registrate nel 1967 e nel 1945 e, per l'inverno, nel 1990.

Infine, sono state confrontate le portate annuali e stagionali calcolate su tre differenti periodi: la serie completa (1935-2018), il trentennio di riferimento WMO (1961-1990) e gli ultimi 19 anni (2000-2018) in Figura 33: non si notano sostanziali differenze nei tre periodi considerati; solo in primavera si evidenzia una lieve crescita dei valori negli anni dal 2001 al 2018.

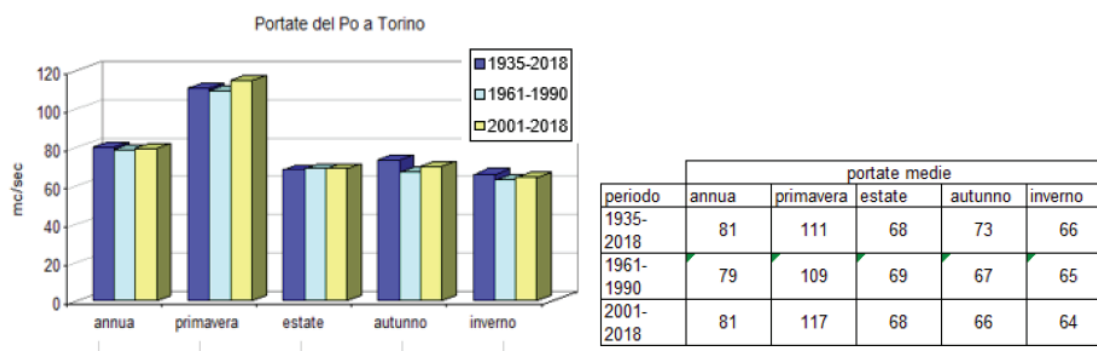


Figura 34 Portate medie annuali e stagionali del Po a Torino nei tre diversi periodi temporali analizzati.

2.4 Neve

Considerando le nevicate mensili della città di Torino, si può osservare che le stagioni più nevose sono state quella del 2008-2009 con 68 cm di neve fresca e quella del 2012-2013 con 56 cm.

neve fresca (cm)	nov	dic	gen	feb	mar	apr
1999-2000	4,0	11,0	2,0	0,0	0,0	0,0
2000-2001	0,0	5,0	0,0	9,0	5,0	0,0
2001-2002	0,0	4,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2002-2003	0,0	2,0	3,0	1,0	0,0	0,0
2003-2004	0,0	7,0	11,0	20,0	0,0	0,0
2004-2005	0,0	7,0	1,0	16,0	2,0	0,0
2005-2006	1,0	1,0	20,0	10,0	0,0	0,0
2006-2007	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2007-2008	0,0	0,0	3,0	5,0	0,0	0,0
2008-2009	5,0	25,0	32,0	3,0	0,0	3,0
2009-2010	0,0	15,0	14,0	10,0	13,0	0,0
2010-2011	2,0	4,0	4,0	0,0	10,0	0,0
2011-2012	0,0	0,0	23,0	25,0	0,0	0,0
2012-2013	0,0	10,0	10,0	29,0	7,0	0,0
2013-2014	0,0	5,0	5,0	0,0	0,0	0,0
2014-2015	0,0	0,0	2,0	14,0	0,0	0,0
2015-2016	0,0	0,0	0,0	0,0	8,0	0,0
2016-2017	0,0	2,0	8,0	0,0	0,0	0,0
2017-2018	0,0	14,0	0,0	6,0	12,0	0,0
2018-2019	0,0	3,0	7,0	6,0	0,0	0,0
MEDIA	0,6	5,8	7,3	7,7	2,9	0,2

Il mese invernale mediamente più nevoso è febbraio (7.7 cm di media), il meno nevoso è dicembre (5.8 cm in media), meno frequenti sono le nevicate precoci (0.6 cm in media a novembre) e rare quelle tardive (0.2 cm in media ad aprile).

Anche se i valori sono bassi e gli eventi relativamente rari, confrontando gli ultimi 10 anni con la media dell'intero periodo, si evince una diminuzione degli eventi nevosi anche importante, nei mesi di febbraio e marzo (Figura 35).

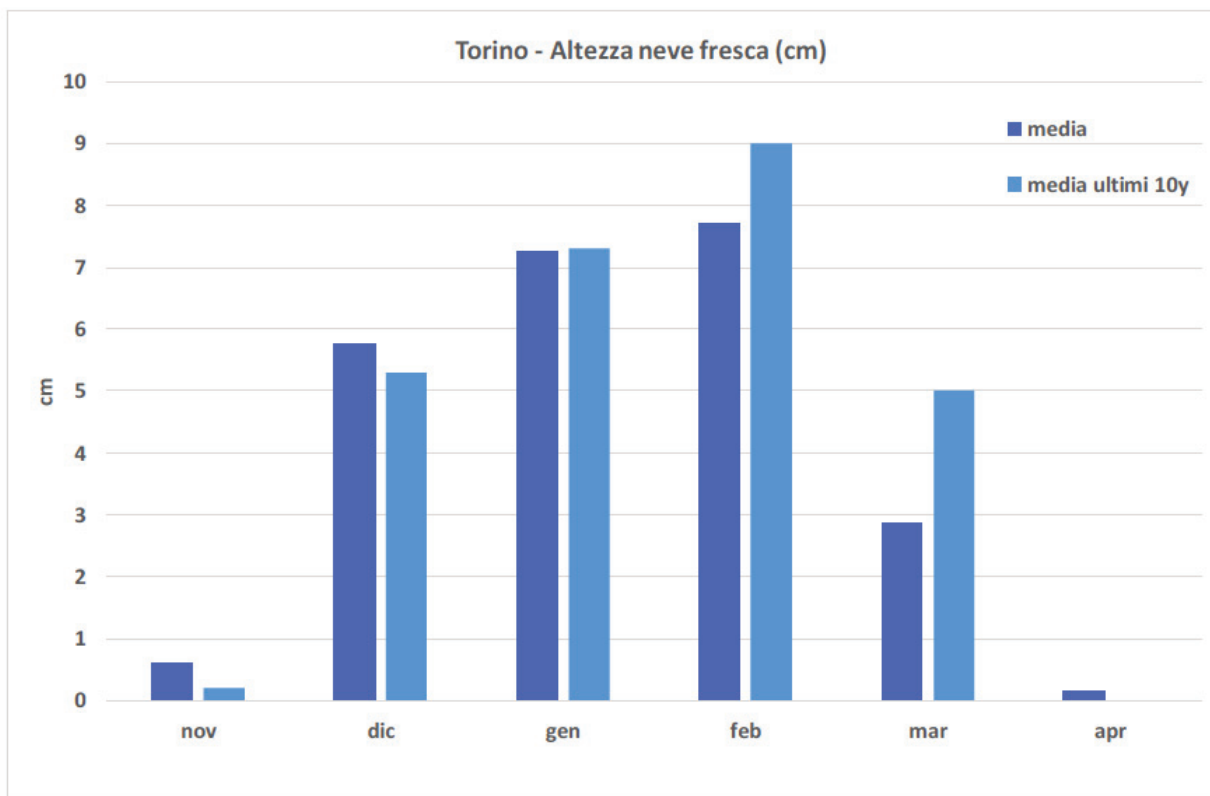


Figura 35 Altezza della neve fresca mensile (in cm) della città di Torino degli ultimi 10 anni 2009-2010 (in azzurro chiaro) confrontata con la media 1999-2019 (in blu).

2.5 Vento

2.5.1 Vento medio

Per analizzare il vento della città di Torino sono stati utilizzati i dati di due stazioni di monitoraggio della rete di Arpa ubicate nel centro urbano, Via della Consolata e Alenia, considerando i dati dal momento della loro installazione.

Analizzando la distribuzione del vento mediato sui 10 minuti, si trova che la maggior parte dei valori risultano inferiori a 18 km/h e mediamente il 30% dei valori corrispondono a calma di vento (<0.3 m/s) (Figura 36).

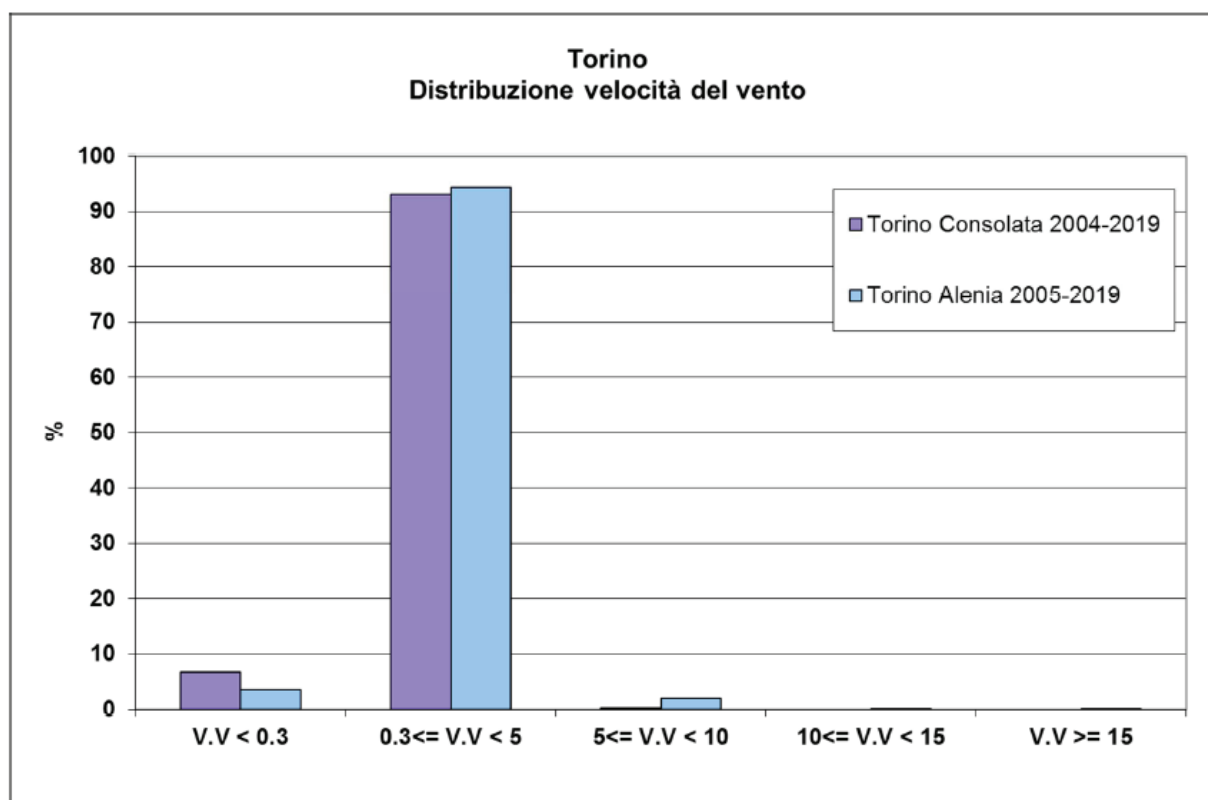
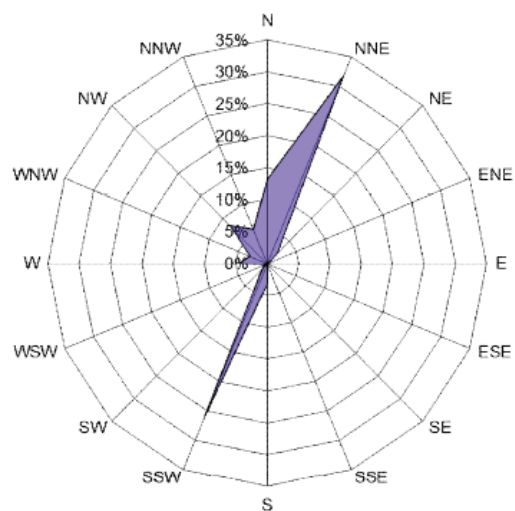


Figura 36 Distribuzione percentuale in classi della velocità del vento nelle stazioni di monitoraggio di Torino Consolata e Torino Alenia.

Per analizzare la direzione di provenienza del vento si utilizzano le rose dei venti che rappresentano le frequenze (esprese in percentuale) che si verificano per ogni singola direzione tra le sedici della classificazione in quadranti.

Per quanto riguarda la direzione del vento nella stazione di Torino Alenia prevalgono le direzioni NNE e SSW, mentre nella stazione di monitoraggio di Torino Consolata risultano dominanti le direzioni ENE e SSW (Figura 37).

**Frequenza delle direzioni di provenienza del vento
a Torino Alenia (2005-2019)**



**Frequenza delle direzioni di provenienza del vento
a Torino Consolata (2004-2019)**

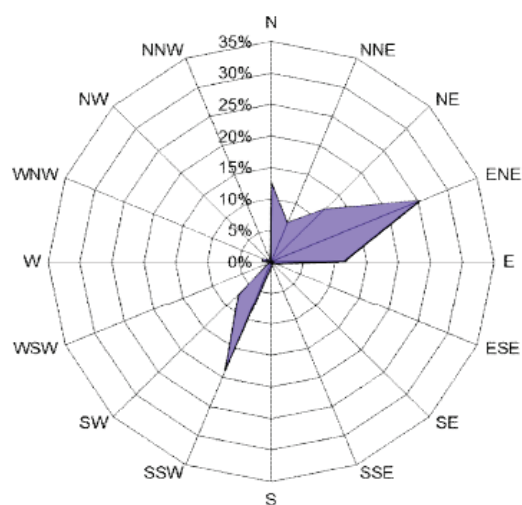


Figura 37 Rosa dei venti di Torino Alenia (a sinistra) e di Torino Consolata (a destra). Sull'asse sono rappresentate le frequenze di occorrenza in percentuale.

2.5.2 Massima raffica

Per considerare i valori estremi della velocità del vento misurati dalle stazioni, sono stati calcolati i percentili (90°, 95° e 99°) della raffica oraria e la massima raffica oraria (Figura 38) per ogni anno. I valori, più elevati nella stazione di Torino Alenia dove la massima raffica oraria annuale è sempre superiore a 18 m/s (pari a 65 km/h), raggiungono punte massime di 28.6 m/s (103 km/h). Si evidenziano così differenze nelle diverse aree di Torino ma non si evincono delle tendenze, tenuto conto che le serie storiche sono relativamente brevi.

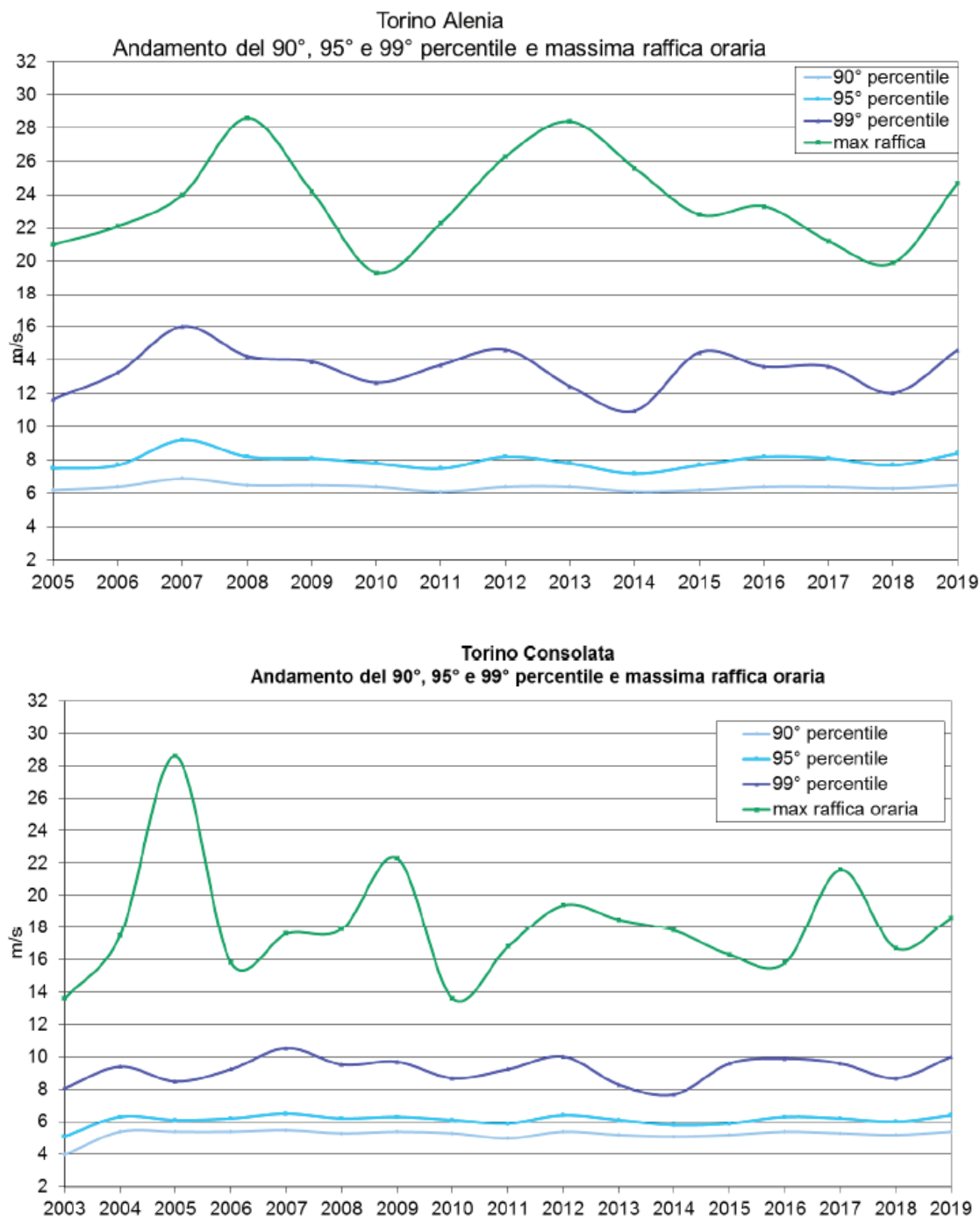


Figura 38 Andamento del 90°, del 95°, del 99° percentile e della massima raffica oraria nelle stazioni di monitoraggio di Torino Alenia (sopra) e Torino Consolata (sotto).

3 Il Clima a Torino – gli effetti

3.1 Gradi giorno

I gradi giorno di riscaldamento sono un parametro empirico utilizzato per il calcolo del fabbisogno termico di un edificio e rappresentano la somma delle differenze tra la temperatura dell'ambiente riscaldato (convenzionalmente 20°C) e la temperatura media esterna; la differenza è considerata nel calcolo solo se positiva. Nella Figura 39 sono rappresentati i gradi giorno della città di Torino calcolati dal 1952 al 2019 per il periodo 15 ottobre-15 aprile. I valori medi pari a 2444 rientrano nei valori della fascia climatica “E” con gradi giorno compresi tra 2100-3000.

La normativa italiana prevede che la fascia climatica “E” possa utilizzare l'impianto termico dal 15 ottobre al 15 aprile.

Analizzando l'andamento dal 1952 al 2019 si evince una tendenza dei gradi giorno alla diminuzione, che corrisponde ad un minore fabbisogno termico, in accordo con la tendenza all'aumento delle temperature legato al riscaldamento.

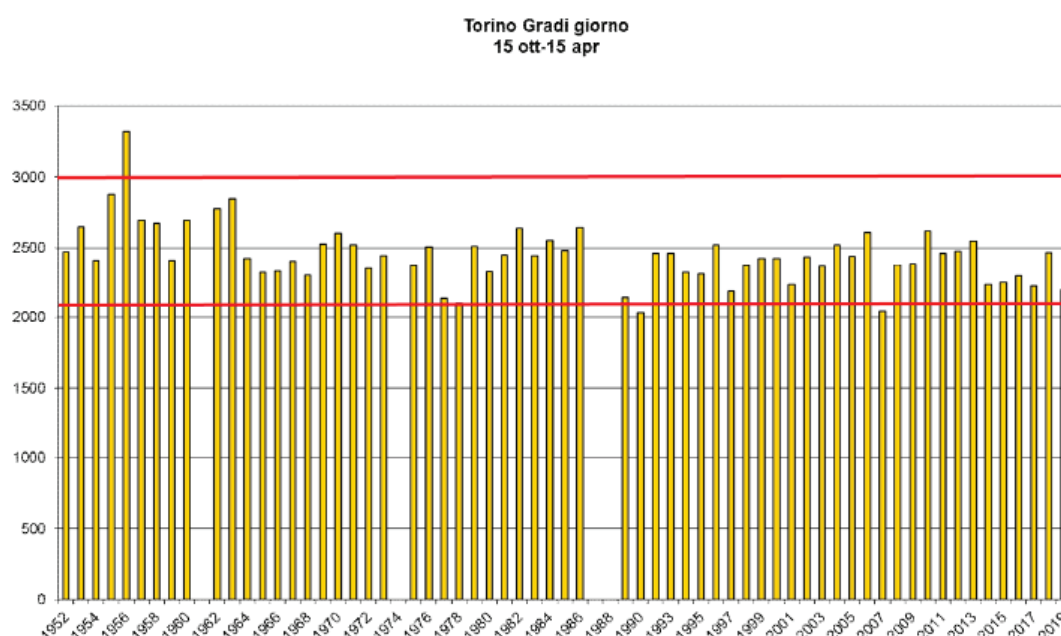


Figura 39 Gradi giorno della città di Torino dal 1952 al 2019, calcolati dal 15 ottobre al 15 aprile. Le linee rosse rappresentano la fascia climatica “E”.

La diminuzione, considerando i due periodi 1952-1987 e 1988-2019, è circa del 7%, come si evince nella tabella sottostante.

gradi giorno medi	
1952-1987	2521
1988-2019	2360

Tale diminuzione non è comunque sufficiente a modificare la fascia climatica a cui appartiene l'area urbana di Torino.

3.2 Ondate di caldo

Secondo la World Meteorological Organization (WMO) e la World Health Organization (WHO) il numero di eventi estremi correlati alle temperature aumenterà con frequenza sempre maggiore. Uno dei rischi previsti con maggiore probabilità in relazione alla salute della popolazione è legato alla frequenza delle Ondate di Calore e alla loro durata. Con questo termine ci si riferisce a un fenomeno naturale che determina situazioni di pubblica emergenza, come nell'estate del 2003, e che, anche quando si manifesta in modo meno grave, determina impatti sulla salute rilevanti e misurabili.

Pur trattandosi di un evento abbastanza ricorrente nel periodo estivo, non solo in Italia, non è ancora stata individuata una definizione ufficiale e univoca a livello globale.

Nonostante questo, la comunità scientifica internazionale ha convenuto che l'ondata di calore sia un periodo con una durata minima di almeno due/tre giorni, in cui si verifica una situazione di caldo intenso, dove la temperatura è generalmente più calda della media, sia in condizioni asciutte sia umide.

L'intensità, la durata e il tempo sono tre fattori caratterizzanti che determinano la gravità dell'impatto sulla popolazione. Tali caratteristiche possono variare molto a seconda dell'area geografica e della stagione. Generalmente si possono identificare due diverse tipologie di ondate di calore.

La prima fa riferimento a ondate di calore che avvengono in luoghi con un clima continentale o mediterraneo. Queste sono dette Dry Heatwaves - ondate di calore secche - e sono molto spesso associate a periodi in cui si assiste alla presenza di cielo sereno, e quindi a forti input di radiazione solare. Se, inoltre, nella stessa circostanza si creano delle condizioni ventose, il fenomeno è ancor più aggravato.

La seconda tipologia riguarda le Moist Heatwave - ondate di calore umide - che sono caratterizzate da temperature estreme, condizioni umide sia durante il giorno sia durante la notte, con la presenza di nuvole durante il periodo notturno, che non favoriscono la dispersione del calore, facendolo così accumulare a quello che si viene a creare durante il giorno. Le ondate di calore umide sono molto spesso localizzabili in aree temperate a media latitudine e in climi marittimi (World Meteorological Organization et al., 2015).

Le Ondate di Calore sono tra gli eventi estremi più diffusi e possono ricoprire un'area piuttosto ampia nello stesso momento. La caratteristica principale che le differenzia dagli altri eventi estremi sta nel fatto che non lasciano una chiara catena di distruzione lungo il loro percorso, per questo vengono chiamate Silent Killers, cosa che le rende alquanto pericolose (Luber et. al, 2008).

3.2.1 Definizione di ondate di caldo

Per studiare il fenomeno delle ondate di calore nella città di Torino si possono utilizzare diversi indici proposti dal World Meteorological Organization (WMO) e dal World Health Organization (WHO) o sceglierne altri proposti dalla letteratura recente. Tali indici climatici consentono di descrivere lo stato e i cambiamenti che avvengono nel sistema climatico e permettono evidenziare e riassumere gli aspetti climatologici dell'area considerata. Gli attributi di un'ondata di calore che ne quantificano l'intensità sono riassunti nella tabella sottostante:

1. HWN (HEAT WAVE NUMBER)	Il numero annuale di ondate di calore durante il periodo estivo (maggio-settembre)	Numero di eventi
2. HWD (HEAT WAVE DURATION)	La lunghezza dell'ondata di calore più lunga del periodo estivo (maggio-settembre)	Giorni
3. HWF (HEAT WAVE DAY FREQUENCY)	Il totale del numero di giorni del periodo estivo (maggio-settembre) in cui si verifica un'ondata di calore	Giorni

L'indice scelto nell'analisi è l'indice Excess Heat Factor (EHF) che definisce un'ondata di calore quando si verificano per 3 o più giorni consecutivi le condizioni positive di Excess Heat Factor ($EHF \geq 0$). Il fattore di eccesso di calore (EHF) è stato definito nel 2011 dalla Commissione per la Climatologia (CCL) della World Meteorological Organization (WMO), un team di esperti a livello internazionale sul rischio climatico e indici settoriali specifici (ET CRSCI) per migliorare il processo decisionale per la pianificazione, la gestione del rischio e le strategie di adattamento ai cambiamenti climatici. In particolare, l'indice EHF è stato utilizzato in diversi studi basati sulla relazione calore-salute (Ina Keggenhoff et al., 2015). La scelta di questo indice, a discapito di quelli più complessi utilizzati per il Bollettino di Previsione delle Ondate di Calore emesso nella stagione estiva da Arpa Piemonte, è dovuta principalmente alla possibilità di essere calcolato anche per gli scenari futuri, dove la disponibilità delle variabili meteorologiche è limitato nella tipologia e nella frequenza temporale.

L'Excess Heat Factor (EHF) è il prodotto della combinazione di due indici: EHSig e EHIaccl (che comprende una componente di acclimatazione). I valori positivi dei EHF indicano il verificarsi di un evento ondata di caldo. L' EHF è calcolato con la seguente formula:

$$EHF = EHSig \times \max(1, EHIaccl) \text{ } ^\circ\text{C}$$

L'EHF quindi combina una misura del calore in eccesso (EHSig, ovvero la deviazione rispetto alla temperatura media sul lungo periodo, calcolata sul periodo di riferimento, in questo caso 1971-2000), tenendo conto dell'acclimatazione locale nel breve periodo e dello stress termico (EHIaccl, ovvero la deviazione della temperatura media da quella dei precedenti 30 giorni). Infatti, EHIaccl incorpora indirettamente l'effetto dell'umidità sulla tolleranza indiretta al calore, usando la temperatura media, piuttosto che la massima giornaliera. I valori dell'indice EHF sono calcolati su una media di 3 giorni di temperatura per ricavare un indice di intensità dell'onda di calore (Ina Keggenhoff et al., 2015).

Si analizza in dettaglio il significato dei due indici che vengono combinati per produrre L'Excess Heat Factor. Il primo indice (EHSig), è stato realizzato dal BoM Australian Bureau of Meteorology e misura quanto è il livello di calore in eccesso rispetto alle condizioni climatiche locali, ovvero il 95° percentile della temperatura media. Esso considera la relazione tra temperature massime e minime mediate su un periodo di tre giorni rispetto ad un valore di riferimento (il 95° percentile della temperatura giornaliera

Ti per un periodo di riferimento calcolato utilizzando tutti i giorni dell'anno) delle temperature medie osservate giornaliere (media della temperatura massima e minima di un singolo giorno in un periodo comune dalle 09:00 a.m. alle 09:00 a.m., ora locale). In questo caso quindi se la media delle temperature giornaliere (DMT) dei 3 giorni supera il 95°percentile, si ha un evento significativo di eccesso di calore o un'ondata di calore (Ina Keggenhoff et al., 2015).

$$EHSig = (T_1 + T_2 + T_3)/3 - T_{95} \text{ con } T_{95} = (T_1 + T_2 + T_3)/2 \text{ riferita al giorno } i$$

EHSig non è altro che un'anomalia della temperatura media giornaliera di tre giorni rispetto al 95° percentile della temperatura media giornaliera. Il secondo indice, simile alla struttura dell'EHSig, fa riferimento a quanto è caldo il periodo dei 3 giorni considerati rispetto ai 30 giorni precedenti (è un'anomalia di tre giorni DMT) (Nairn e Fawcett, 2013). Nel fare un confronto con i 30 giorni precedenti, l'Excess Heat index-acclimatization (EHIaccl) prende in considerazione l'acclimatazione nel breve periodo (Ina Keggenhoff et al., 2015). Quindi esso rappresenta un indice di temperature anomale di breve periodo e la dimensione dell'anomalia fornisce il livello di stress termico, a differenza dell'EHSig che fornisce un indice di lungo periodo (Ina Keggenhoff et al., 2015).

$$EHIaccl = (T_1 + T_2 + T_3)/3 - (T_{-1} + \dots + T_{-30})/30 \text{ dove } T_i \text{ è DMT} = (T_1 + T_2 + T_3)/2$$

Per questo indice e per il periodo 15 maggio – 15 settembre (1951-2016), sono state valutate nella città di Torino il numero annuo delle ondate di calore, la lunghezza dell'evento più lungo e la somma dei giorni in cui si verifica un'ondata di calore. L'andamento di questi tre parametri è rappresentato in Figura 40.

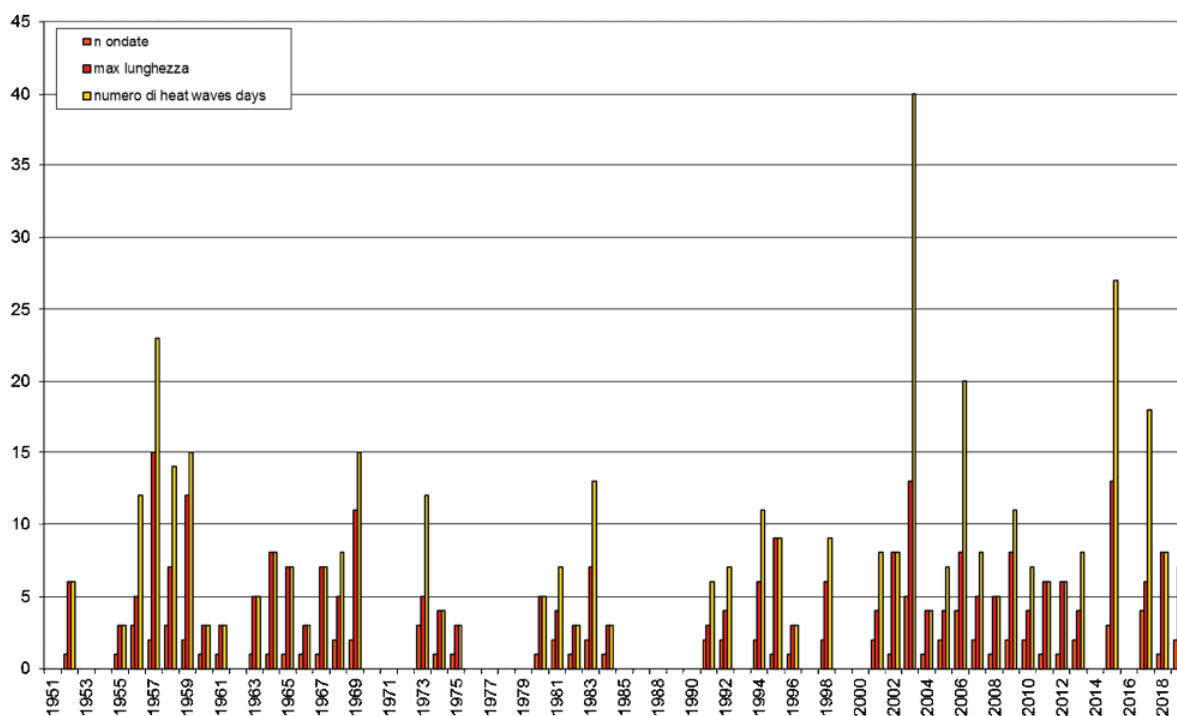


Figura 40 Indice Excess Heat Factor (EHF) della città di Torino calcolato sul periodo 15 maggio - 15 settembre (1951-2019). In rosa il numero di ondate di calore, in rosso la massima lunghezza e in giallo il numero di giorni in ondata di calore.

Dal grafico si osserva che l'indice è piuttosto concorde alle reali condizioni climatiche verificate. L'anno 2003 è chiaramente quello maggiormente soggetto alle ondate di calore: se ne stimano 5, la più lunga ha una durata di 13 giorni (dal 1 al 13 agosto), per un totale di giorni caratterizzati da un'ondata di caldo pari a 40, distribuiti nei mesi di giugno, luglio e agosto. Il secondo anno più caldo, il 2015, presenta 3 ondate di calore con una durata massima di 13 giorni (dall'11 al 23 luglio) e un totale di giorni cumulati in cui si verifica l'ondata pari a 27. Un altro anno, secondo questo indice, che merita di essere nominato è il 2006, con un numero di ondate di calore pari a 4, quella con la massima lunghezza è stata di 8 giorni (dal 18 al 25 luglio) per un totale di giorni in ondata pari a 20. Dalla Figura 40 è difficile evidenziare un trend statisticamente significativo, anche se si può osservare come le estati più critiche dal punto di vista del caldo si siano verificate nel nuovo millennio e come negli ultimi anni ci sia pressoché sempre almeno un'ondata di caldo definita con questo indice.

Questo si evidenzia anche considerando la variazione delle temperature massime a Torino rispetto al periodo di riferimento 1971-2000, e gli anni più caldi della distribuzione. Dalla Figura 41 si osserva come la media degli ultimi 20 anni delle temperature massime sia aumentata di circa 5°C rispetto alla media 1971-2000 e si avvicini a quella delle estati più calde del 2003, del 2015 e del 2017.

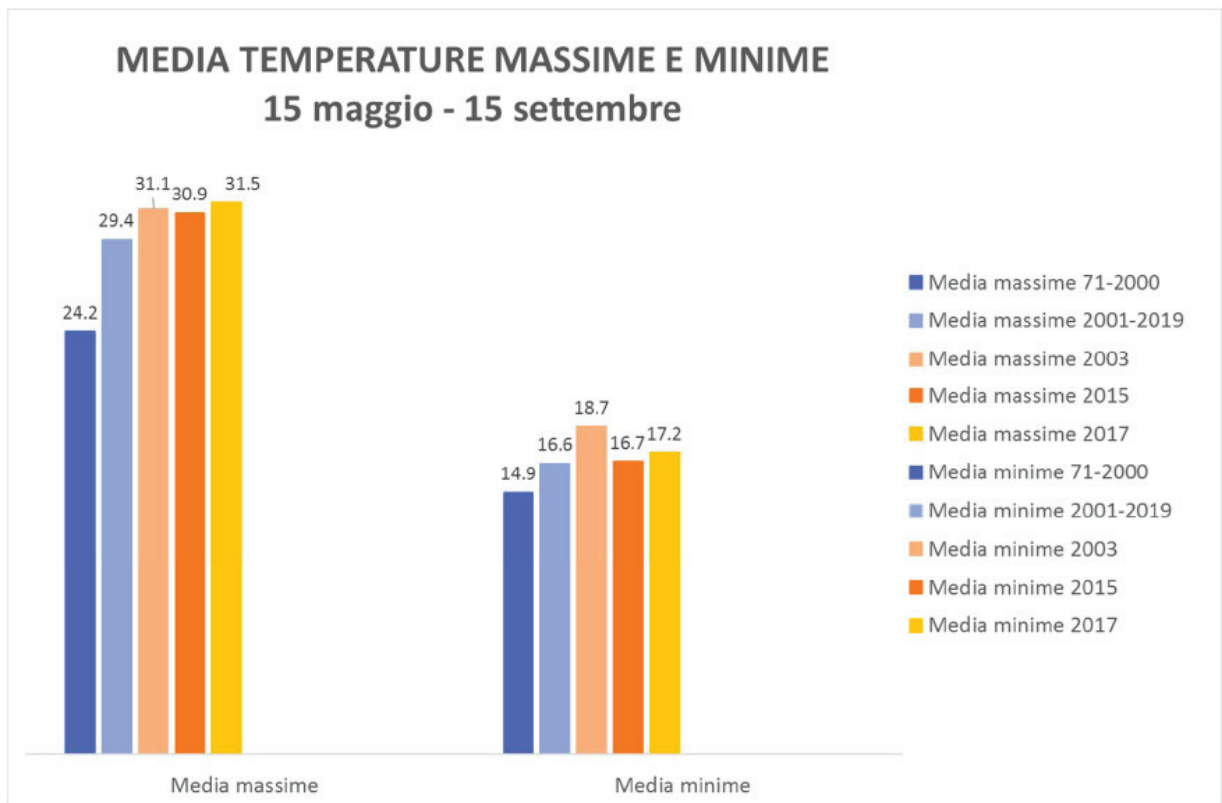


Figura 41 Media delle temperature massime e minime a Torino nel periodo 1971-2000, 2012-2016 e quelle degli anni più caldi.

Per studiare le interazioni tra i fenomeni atmosferici e l'organismo umano vengono utilizzati gli indici biometeorologici, atti a esprimere oggettivamente le condizioni di benessere o di disagio fisiologico dell'uomo in relazione alla combinazione di più fattori ambientali. Tali indici sono semplici formule empiriche basate su alcuni dei parametri meteorologici più comunemente rilevati dalle stazioni di misura: temperatura e umidità dell'aria, velocità del vento, pressione al suolo. Dall'applicazione di tali formule si ottiene una stima della temperatura effettivamente percepita dal corpo umano. La temperatura così stimata deve essere confrontata con i valori soglia riportati nelle tabelle di classificazione biometeorologica ottenute attraverso studi effettuati su una popolazione campione. Le soglie contenute nelle tabelle permettono di individuare una precisa condizione fisiologica rappresentata da condizioni di benessere o disagio.

I principali indici biometeorologici sono:

- Temperatura apparente - stima il disagio fisiologico dovuto all'esposizione a condizioni meteorologiche caratterizzate da alte temperature ed elevati livelli igroscopici dell'aria, nonché da ridotta velocità del vento a 10 m dal suolo.

Formula: $AT[^\circ C] = -2.7 + 1.04T + 2.0e/10 - 0.65v$

T [K]=temperatura aria

e [hPa]=tensione di vapore

Soglie di disagio fisiologico definite in letteratura:

AT < 27 °C	Benessere
27 ≤ AT < 32	Cautela
32 ≤ AT < 40	Estrema cautela
40 ≤ AT < 54	Pericolo
AT ≥ 54	Elevato pericolo

- indice di Thom o Discomfort index - è uno degli indici più utilizzati per la stima della temperatura percepita ed è sensibile in un intervallo termico compreso tra i 21°C ed i 47°C.

Formula: $DI = T - (0.55 - 0.0055 \cdot UR) \cdot (T - 14.5)$

T [°C] = temperatura dell'aria

UR [%] = umidità relativa

Soglie di disagio fisiologico definite in letteratura:

DI < 21	Benessere
21 ≤ DI < 27	Cautela
27 ≤ DI < 29	Estrema cautela
29 ≤ DI < 32	Pericolo
DI ≥ 32	Elevato pericolo

- Humidex - valuta il benessere climatico nei giorni caldi ed umidi e si basa sulla relazione empirica che prende in considerazione la temperatura dell'aria e la tensione di vapore. È sensibile per temperature comprese tra i 20 °C ed i 55 °C.

Formula: $H = T + (0.5555 \cdot (e - 10))$

T [°C] = temperatura dell'aria

e [hPa] = tensione di vapore

Soglie di disagio fisiologico definite in letteratura:

H < 27°C	Benessere
27 ≤ H < 30	Cautela
30 ≤ H < 40	Estrema cautela
40 ≤ H < 55	Pericolo
H ≥ 55	Elevato pericolo

Giorni tropicali: l'indicatore esprime il numero di giorni con temperatura massima dell'aria maggiore di 30°C nel periodo estivo. Notti tropicali: l'indicatore esprime il numero di giorni con temperatura minima dell'aria maggiore di 20°C nel periodo estivo. Tenendo conto delle soglie di disagio fisiologico è stato calcolato il numero di giorni caratterizzato da disagio nei periodi 1989-2016 e 2001-2016 (Figura 42) per valutare se gli ultimi 15 anni mostrano un comportamento difforme rispetto all'intera serie disponibile.

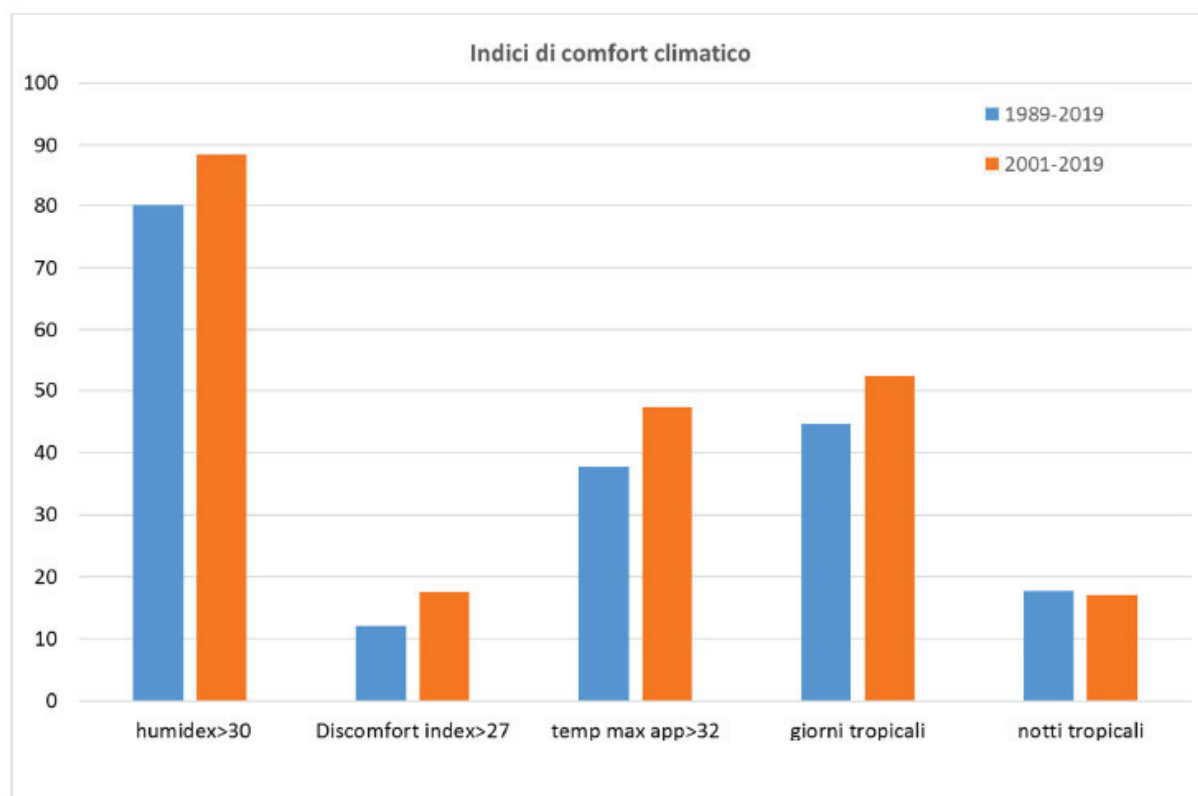


Figura 42 Indici di comfort climatico della città di Torino nei periodi 1989-2016 e 2001-2019.

Dall'analisi dei dati emerge che per tutti gli indici, ad eccezione delle notti tropicali, si assiste ad un sensibile aumento del numero di giorni caratterizzati da disagio nell'ultimo quindicennio.

3.2.2 Ondate di caldo e mortalità

Le ondate di calore determinano una serie di conseguenze sulla società, in primis sulla salute umana. Il caldo intenso e persistente è associato ad aumenti sia della mortalità sia della morbidità, in particolare dei soggetti più fragili, sia per caratteristiche di età, di genere, di condizioni di salute e per condizioni di disagio sociale. Questo è stato documentato in numerosi studi, la maggior parte dei quali prodotti da enti di sanità pubblica e organizzazioni internazionali; si vedano ad esempio i rapporti dell'IPCC e dell'Organizzazione mondiale della sanità (WHO), (IPCC, 2007). Un aspetto sicuramente preoccupante, in questo contesto, riguarda dunque l'intensificarsi degli estremi climatici associati all'aumento delle temperature. L'aumento di mortalità dovuta al caldo è correlato alle differenze tra gli estremi delle temperature e la temperatura media (soprattutto agli inizi dell'estate quando le persone non si sono ancora abituate alle temperature più alte) e quindi al fenomeno delle ondate di calore, definite come estesi periodi con temperature estremamente alte. Il rapporto tra ondate di calore e la mortalità è stato ampiamente studiato in letteratura. Per esempio, l'eccesso di mortalità durante la calda estate del 2003 in Europa è stato stimato in circa 50.000. Per individuare la relazione tra le ondate di calore e l'eccesso di mortalità della popolazione dei soggetti più fragili (anziani over 65), è stata utilizzata la serie storica fornita dal Dipartimento Tematico per l'Epidemiologia e la Salute Ambientale di Arpa Piemonte, che contiene i dati giornalieri della mortalità osservata a Torino dal 1985 al 2015 nel periodo 15 maggio – 15 settembre, nella classe di età over 65. L'eccesso medio annuo di mortalità e il numero di giorni in cui si verifica l'ondata di caldo mostrano una buona relazione lineare (indice di Pearson $r=0.9$), in particolare per gli anni con un elevato numero di giorni interessati da ondate di caldo. Seppure l'approccio lineare possa sembrare semplificato, viene utilizzato perché al contempo sufficientemente robusto e semplice da poter essere applicato anche agli scenari futuri. Tale correlazione risulta statisticamente significativa (con un livello di confidenza del 95%).

3.2.3 Ondate di caldo e consumi energetici

Un altro potenziale impatto generato dai cambiamenti climatici e dal fenomeno delle ondate di caldo è l'incremento dei consumi energetici durante la stagione estiva. Questo è causato dal sempre maggiore utilizzo di impianti di climatizzazione, sia in ambiente domestico sia in ambito commerciale e industriale, per affrontare le crescenti situazioni di disagio fisico dovute al caldo.

I trend della domanda di energia sono di fatto in aumento. Considerando l'anno 2015 come il secondo anno maggiormente colpito dalle ondate di caldo, in Italia la richiesta di energia elettrica ha raggiunto i 316,9TWh, registrando così un incremento del 2,1% rispetto all'anno precedente (Terna, 2016).

In riferimento sempre al caso italiano fino al 2005 i consumi maggiori si verificavano tradizionalmente nel mese di dicembre, ma a partire dal 2009, a seguito degli anni 2005 e 2008 dove i carichi massimi invernali ed estivi furono quasi equivalenti (molto probabilmente per via della crisi, che si è imbattuta anche sui consumi elettrici), la punta si è verificata stabilmente nei mesi estivi di giugno e soprattutto luglio, riconducendo ciò in primo luogo al fattore climatico. Il 22 luglio 2015, il consumo di energia elettrica ha raggiunto un nuovo record storico: 60.5 GW, registrando un aumento di oltre il 17% rispetto al 2014 (Figura 43).

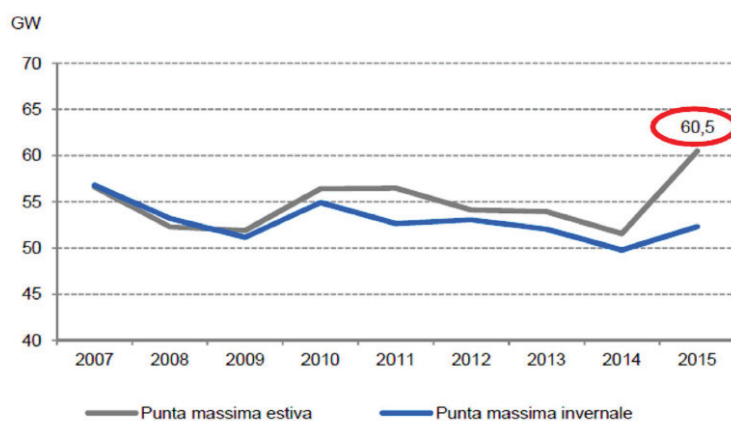


Figura 43 Andamento consumi energetici 2007-2015.
Fonte: TERNA (2016).

I numerosi picchi di consumo elettrico registrati, e i conseguenti prezzi elevati, sono dovuti all'ondata di caldo torrido che ha caratterizzato l'estate 2015, la temperatura il 22 luglio era per l'appunto superiore di circa 6°C rispetto a quella dell'anno precedente (Terna, 2016). Da uno studio di Terna (2016) si evince come ad ogni grado in più sopra i 25°C si debba stimare un aumento della domanda elettrica tra gli 800 e i 1.000 MW.

Analizzando i picchi dei consumi di energia elettrica degli ultimi quattro anni, grazie ai dati forniti da IRETI, società del Gruppo Iren che gestisce sul territorio nazionale la distribuzione di energia elettrica, gas e acqua, si è evidenziato come questi siano in corrispondenza dei momenti più caldi.

In particolare, sono stati analizzati i dati relativi all'andamento dei valori massimi di potenza nella rete elettrica della città di Torino per gli anni 2013, 2014, 2015, 2016 nel periodo 1 maggio – 30 settembre. Tenendo in considerazione una generale tendenza all'aumento dei consumi elettrici degli ultimi anni, è possibile ricavare una relazione quantitativa tra il carico massimo MW della rete elettrica e le ondate di calore. L'aumento della richiesta di energia è evidente nel mese di luglio, con dei picchi che raggiungono i 500 MW per gli anni 2015 e 2016, mentre nel mese di agosto la domanda è fortemente in calo, per poi risalire nel mese di settembre. Si evidenzia anche un andamento settimanale, in cui la domanda è fortemente ridotta nel fine settimana di ogni mese (si veda per esempio l'anno 2015 in Figura 44)

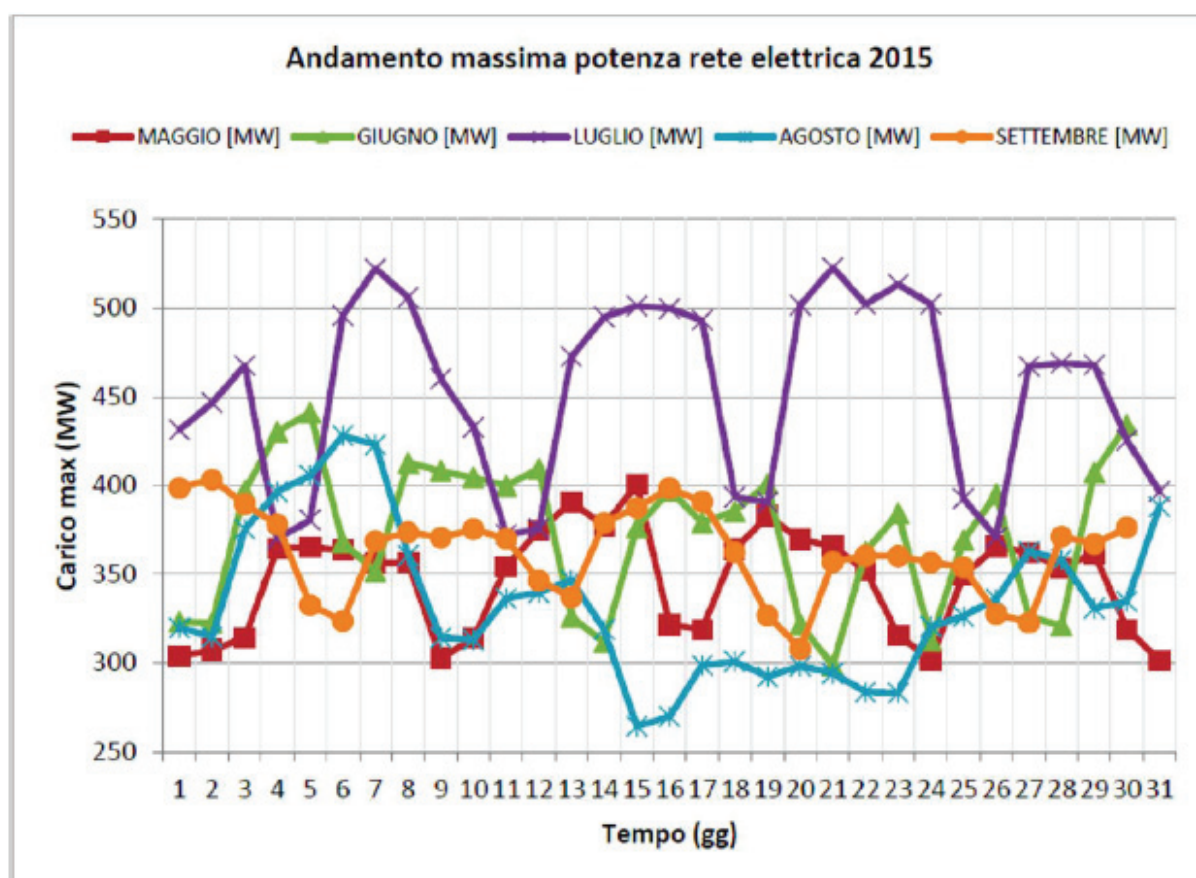


Figura 44 Scomposizione mensile dell'andamento della massima potenza della rete elettrica per l'anno 2015.

Sempre per l'anno 2015 mettendo a confronto in un grafico i tre indici biometeorologici (Temperatura apparente, Humidex e Discomfort Index) con l'andamento del carico massimo MW (Figura 45): è interessante osservare che l'andamento ripercorso tra gli indici e i picchi di energia è molto simile, pertanto i consumi energetici sembrano essere influenzati dalle caratteristiche meteorologiche.

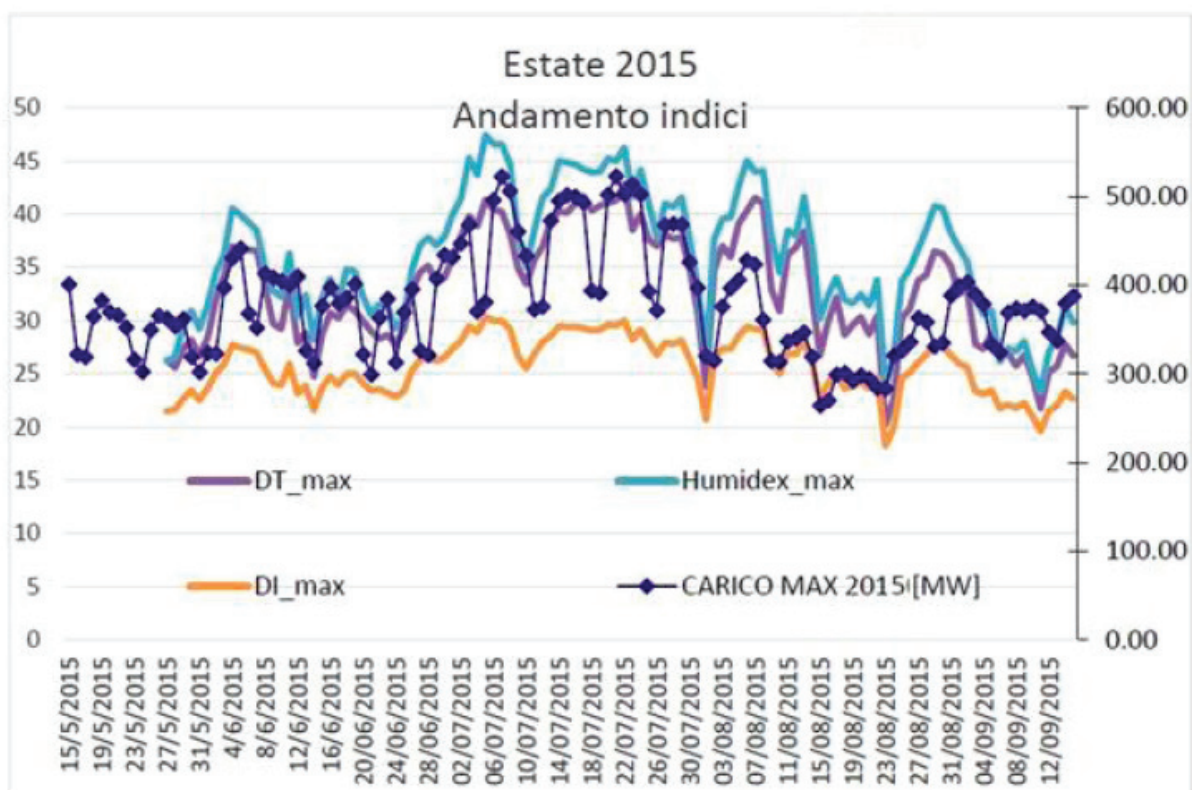


Figura 45 Confronto andamento indici meteorologici e carico massimo MW per l'estate 2015.

La correlazione per ognuno dei tre indici è risultata essere molto bassa (intorno a 0.3 per tutti e tre gli indici) considerando l'intero periodo, a cause delle caratteristiche diverse dei consumi. Considerando solo i mesi di giugno e luglio ed escludendo i weekend, la correlazione sale a 0.59 ed è statisticamente significativa.

3.3 Siccità

Uno dei parametri utilizzati per evidenziare le situazioni con scarsità di precipitazione è la lunghezza massima annuale dei periodi secchi (giorni consecutivi con precipitazione inferiore ad 1 mm). La Figura 46 evidenzia la variazione annuale di tale parametro per la città di Torino dal 1951 al 2019.

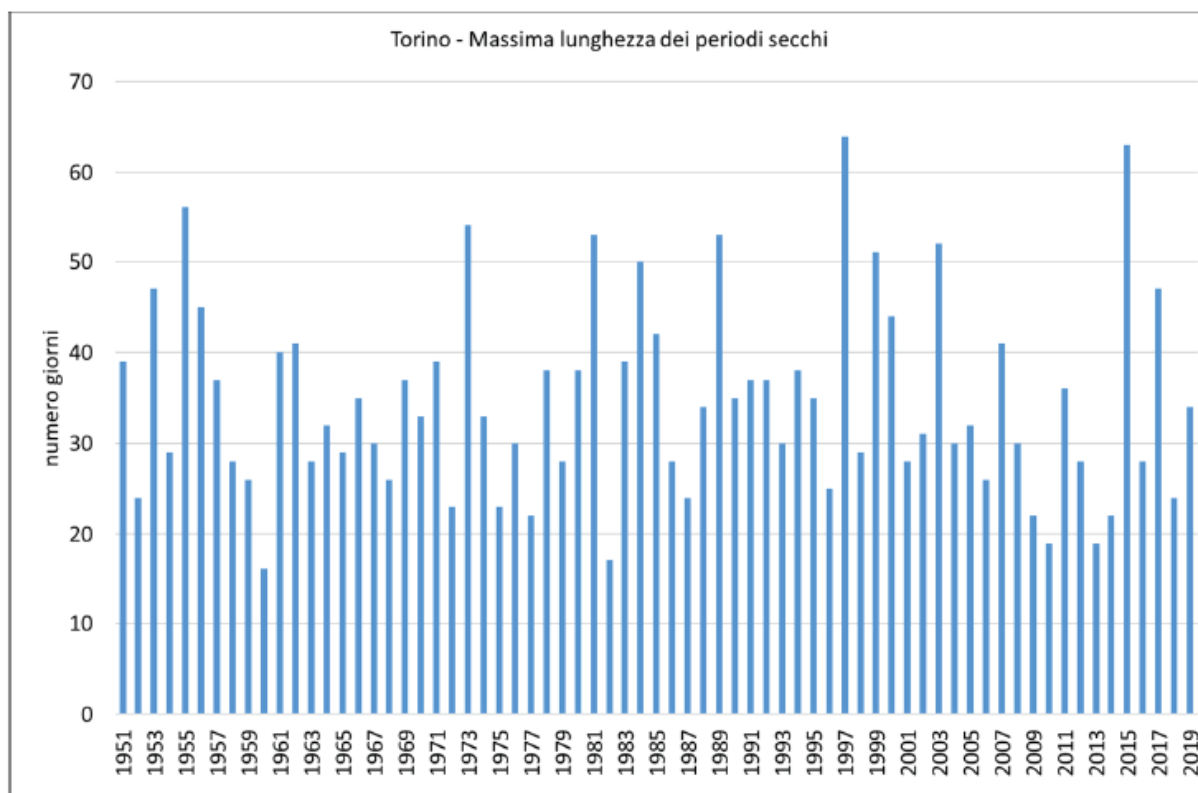


Figura 46 Andamento della massima lunghezza annuale dei periodi secchi a Torino dal 1951 al 2019.

Si evidenziano gli anni 1997 con lunghezza massima dei periodi secchi pari a 64 giorni e il 2015 pari a 63 giorni. Non si evidenzia alcun trend nella serie storica né periodi sufficientemente lunghi (30 anni) caratterizzati da valori medi diversi.

Se non si considera la rigida suddivisione annuale ma si considera l'inverno nel suo complesso, risulta il 1989 tra gli anni più secchi (81 giorni consecutivi senza pioggia nell'inverno 1988-1989), seguito dal 2016 (inverno 2015-2016) e dal 1997 (inverno 1996-1997) con 64 giorni consecutivi. In media si osserva che negli ultimi 15 anni (2001-2019) il numero di giorni consecutivi senza pioggia risulta leggermente inferiore al valore medio dell'intera serie temporale (1951-2016) e a quella del periodo di riferimento 1971-2000.

anni	massima lunghezza dei periodi secchi
1951-2019	34
1971-2000	36
2001-2019	32

Considerando solo il periodo invernale (novembre-marzo) si evidenzia negli ultimi 30 anni circa una maggiore variabilità (alternanza di inverni secchi e umidi) e, nel complesso, una lieve tendenza positiva (Figura 47), nell'ultimo periodo dovuta alla precipitazione del solo 2016.

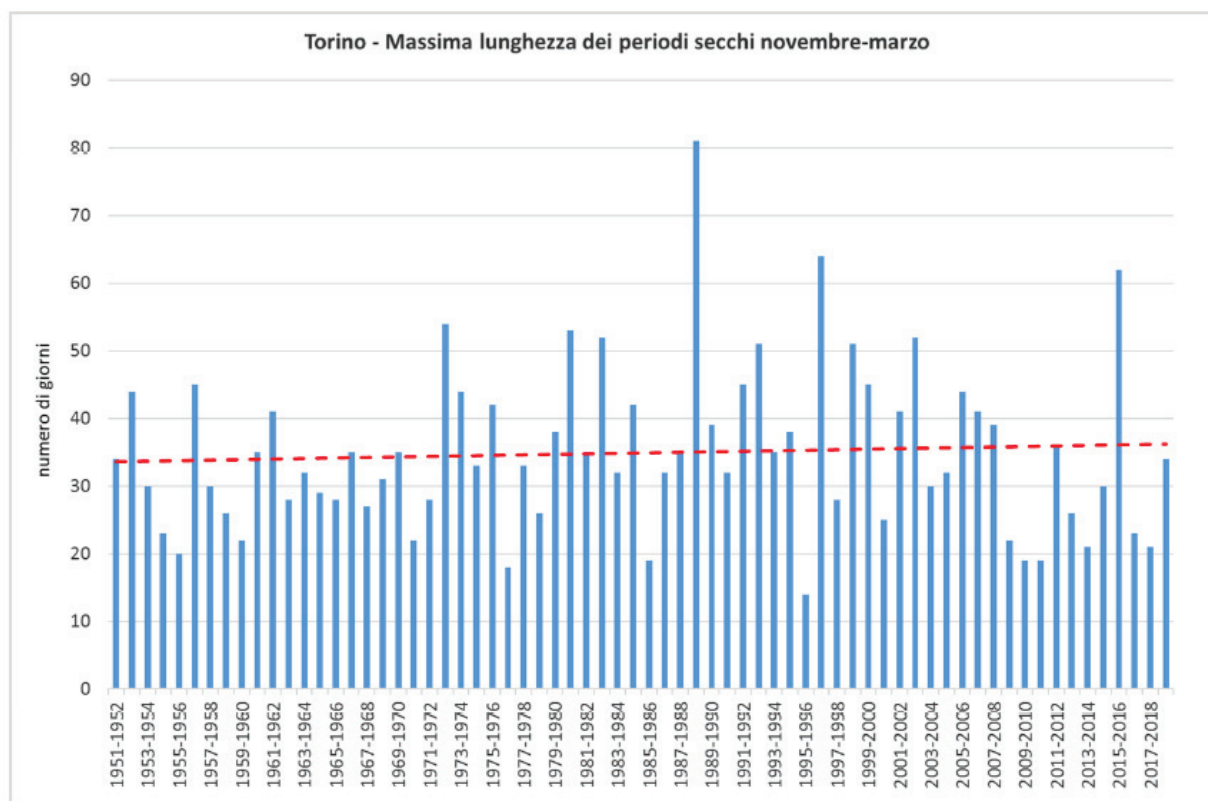


Figura 47 Massima lunghezza dei periodi secchi nella stagione invernale dal 1951-1952 al 2018-2019, in rosso la tendenza lineare.

Sempre per quanto riguarda l'inverno, in media si osserva che negli ultimi 20 anni (2001-2019) il numero di giorni consecutivi senza pioggia risulta inferiore al valore medio dell'intera serie temporale (1951-2019) e a quella del periodo di riferimento 1971-2000.

anni	massima lunghezza dei periodi secchi novembre - marzo
1971-2000	39
1952-2019	35
2001-2019	33

L'analisi della siccità del periodo invernale potrebbe essere utile per una stima qualitativa delle condizioni non favorevoli alla dispersione degli inquinanti. Se però guardiamo l'intera serie temporale disponibile delle concentrazioni medie annuali del PM10 (Figura 48) si osserva un deciso trend negativo dovuto sostanzialmente alla riduzione delle emissioni.

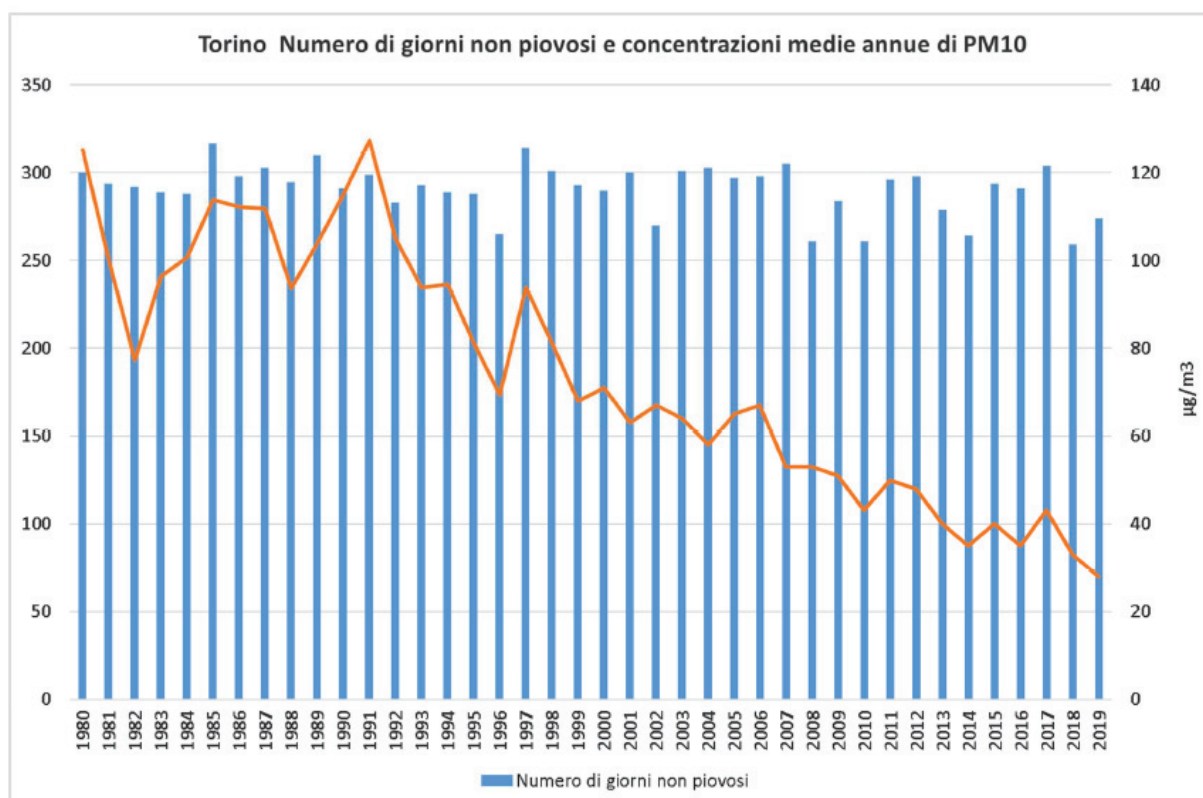


Figura 48 Numero di giorni senza pioggia e concentrazione media annua del PM10 (i dati di PM10 dal 1980 al 1998 sono stimati pari al 70% delle polveri totali sospese -PTS).

Per capire se la variabilità inter-annuale sovrapposta al trend potesse essere legata alle condizioni di piovosità sono stati considerati sia l'andamento del numero di giorni non piovosi e il numero di superamenti della soglia di protezione della salute (pari a 50 microgrammi/m³) della concentrazione di PM10, sia il numero di giorni piovosi e il numero di superamenti detrendizzati (Figura 49).

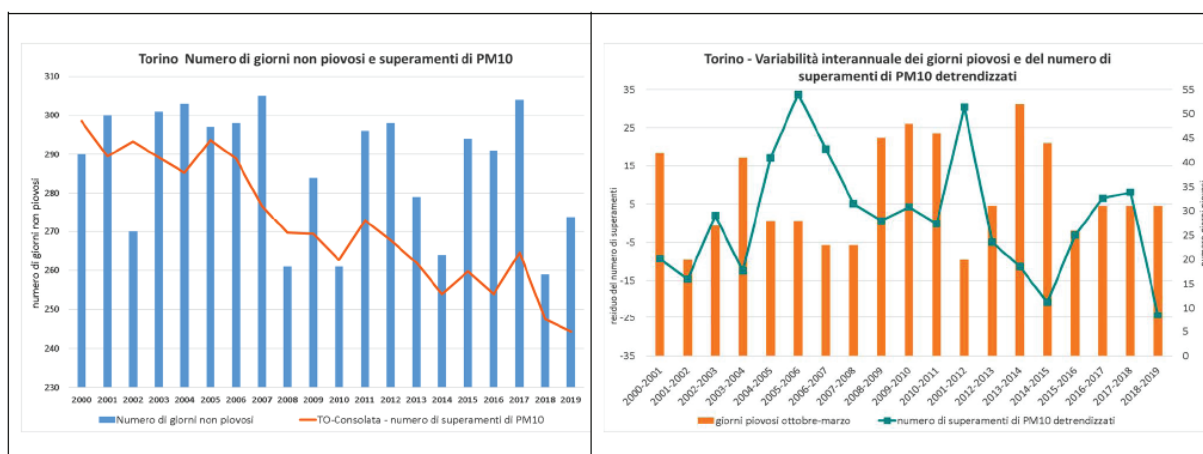


Figura 49 Andamento del numero di giorni non piovosi e del numero di superamenti della concentrazione di PM10 al di sopra della soglia di protezione della salute (a sinistra); andamento del numero di giorni piovosi nel periodo ottobre-marzo e del numero di superamenti della concentrazione di PM10 al di sopra della soglia di protezione della salute detrendizzati (a destra).

Dal grafico si evince che non esiste una correlazione tra il numero di giorni non piovosi e il numero di superamenti di PM10 (Figura 49, grafico a sinistra) considerando la serie di dati disponibile (dal 2000) perché prevale il trend in diminuzione dovuta al calo delle emissioni.

Sottraendo il trend lineare alla serie del numero di superamenti della soglia di protezione della salute per il PM10 e confrontandolo con il numero di giorni piovosi, si evince come negli anni più piovosi sembra esserci una diminuzione delle polveri inquinanti (2008, 2010 e 2014), mentre in quelli più secchi un relativo aumento (2005, 2011 e 2015) ma non si evidenzia una correlazione stringente.

3.4 Pollini

La concentrazione dei pollini in atmosfera può essere interpretata come manifestazione indiretta della fase di fioritura della pianta, fino a considerarla un vero e proprio indicatore di risposta ai cambiamenti climatici. È possibile definire quindi alcuni parametri di pollinazione, analizzarli in relazione ai fattori meteorologici, rilevare eventuali variazioni in corrispondenza di anomalie termiche evidenziando così possibili tendenze verso l'anticipo o il posticipo della pollinazione. Sono stati elaborati i dati aerobiologici della città di Torino relativi ai diversi generi (taxa), scelti in funzione della diffusione delle piante sul territorio monitorato e sul diverso periodo di fioritura, al fine di potere evidenziare al meglio l'influenza delle variazioni climatiche stagionali. L'andamento palinologico è stato descritto nelle sue fasi principali mediante il calcolo di specifici parametri citati in letteratura e considerati maggiormente rispondenti alle variazioni indotte dal clima (Tabella 2).

Tabella 2 Parametri di pollinazione elaborati, per ciascun taxa.

Parametro	Descrizione
Inizio del Periodo Principale di Pollinazione (inizio PPP):	corrisponde al giorno in cui la somma cumulativa dei dati giornalieri raggiunge il 5% del totale annuale e in cui la liberazione di polline è uguale o superiore all'1% del totale annuale (Lejoly-Gabriel, 1978).
Fine del Periodo Principale di Pollinazione (fine PPP)	corrisponde al giorno in cui la somma cumulativa dei dati giornalieri raggiunge il 95% del totale annuale (Goldberg et al., 1988).
Durata della pollinazione	periodo temporale che intercorre tra l'inizio del Periodo Principale di Pollinazione e la fine del Periodo Principale di Pollinazione.

I parametri di pollinazione sono stati elaborati utilizzando tutti i dati disponibili, senza tener conto di una percentuale minima di dati che in genere è il 75%, per avere una maggiore continuità. I grafici sottostanti (Figura 50) mostrano, per gli anni disponibili, l'inizio, la durata e la fine del periodo di pollinazione, per i differenti taxa.

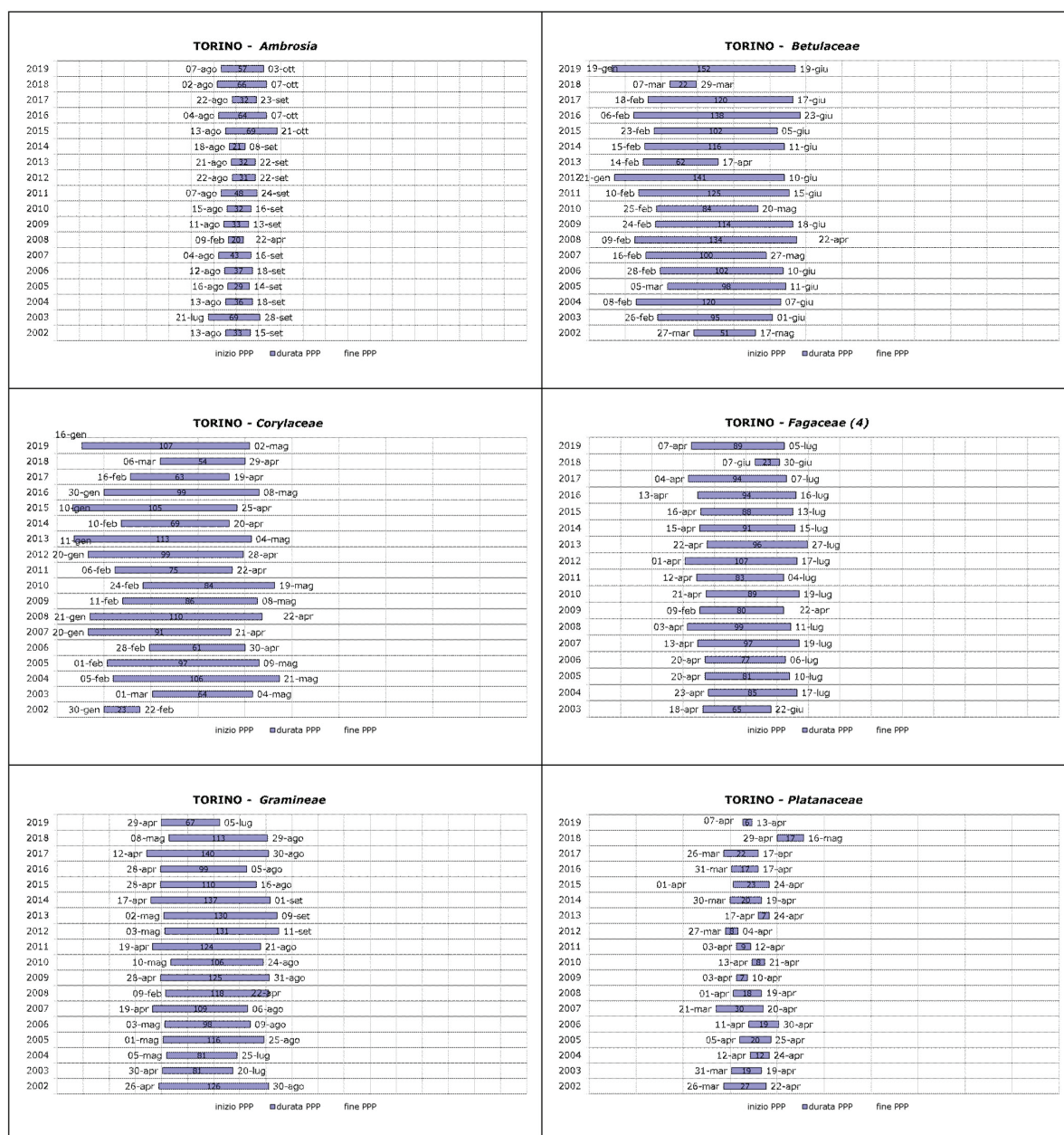


Figura 50 Andamento del periodo di pollinazione (inizio, fine e durata) dei diversi taxa misurati nella stazione di Torino (Orto Botanico, dati Università di Torino).

Le analisi di variazione dei parametri di pollinazione dipendono dalle caratteristiche fenologiche dei diversi taxa e le valutazioni di eventuali influenze meteorologiche devono essere attentamente analizzate.

Si evidenzia dalla Figura 50 come i parametri per alcuni taxa risentano della variabilità meteorologica, ma le serie temporali sono comunque troppo brevi per evidenziare dei possibili trend. In particolare, in estati molto calde come quelle del 2003 e 2015 si rileva un aumento complessivo della durata del periodo di pollinazione per l'Ambrosia.

Anche i periodi caldi di novembre-dicembre influiscono sull'anticipo della pollinazione di alcuni taxa invernali, come le Corylaceae, come si evince per il 2007, ma altri parametri influenzano l'inizio del periodo di pollinazione.

La tabella sottostante, che riporta le temperature medie mensili dei medesimi anni in cui sono state effettuate le analisi sugli indicatori pollinici, può essere di supporto per spiegare alcuni andamenti degli indicatori.

Tabella 3 - Temperatura media mensile di Torino

anno	gen	feb	mar	apr	mag	giu	lug	ago	set	ott	nov	dic
2001	3.5	6.6	10.4	12.5	18.5	21.7	23.9	24.9	16.9	15.7	7.0	1.4
2002	1.6	6.3	11.3	12.9	16.5	22.9	22.6	21.4	17.4	13.0	9.2	5.6
2003	3.1	2.7	10.4	12.6	19.2	26.0	26.5	27.4	18.6	11.3	7.9	4.4
2004	2.8	4.8	8.2	12.8	16.2	22.9	24.4	23.2	19.7	14.7	8.1	4.3
2005	2.5	3.2	9.2	12.4	19.2	23.2	24.4	21.9	18.9	13.2	7.0	1.8
2006	1.4	3.5	8.2	14.1	18.0	23.0	26.6	22.1	20.4	15.2	9.1	4.9
2007	5.5	7.4	10.8	17.0	19.2	21.9	24.8	22.5	18.4	13.3	7.0	3.6
2008	4.4	5.9	10.4	12.6	17.3	21.6	23.8	23.4	18.0	14.3	7.9	3.1
2009	1.2	5.0	10.3	13.5	20.1	22.9	24.5	25.5	20.0	13.3	8.5	2.0
2010	0.9	3.6	8.1	13.4	16.8	21.5	25.7	22.4	18.2	11.7	7.8	1.5
2011	2.3	5.5	9.1	16.2	19.5	20.9	22.1	24.4	20.9	13.0	7.5	4.1
2012	2.8	1.7	12.2	12.1	17.7	22.8	24.4	25.1	18.8	13.8	8.8	2.3
2013	3.5	2.8	7.4	13.1	15.6	21.0	24.8	23.4	19.1	13.6	7.7	3.3
2014	4.2	6.1	10.6	14.4	16.8	21.7	21.8	21.4	18.7	15.0	9.5	5.0
2015	3.9	4.2	9.9	14.0	18.5	22.6	27.9	23.5	18.0	12.5	8.1	4.7
2016	3.8	6.4	9.4	14.7	16.9	21.7	25.1	24.3	21.0	12.8	8.3	4.2
2017	1.7	6.4	12.3	14.4	18.9	24.5	25.3	25.3	18.4	14.5	7.5	2.1
2018	5.5	3.4	7.6	15.5	18.1	23.0	25.3	25.0	20.7	14.9	9.4	3.9
2019	3.1	6.8	11.5	12.9	15.4	23.4	25.2	23.9	19.5	15.1	8.5	5.9

Tabella 4 - Anomalia della temperatura media mensile di Torino rispetto alla media (2001-2019) con una scala di colori che evidenzia gli scarti negativi (più freddo della media) e positivi (più caldo della media)

	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
gen	0,5	-1,4	0,1	-0,3	-0,6	-1,7	2,5	1,3	-1,8	-2,2	-0,7	-0,2	0,4	1,2	0,9	0,7	-1,4	2,5	0,1
feb	1,7	1,4	-2,2	-0,1	-1,7	-1,3	2,5	1,0	0,1	-1,2	0,7	-3,2	-2,0	1,2	-0,6	1,6	1,6	-1,5	1,9
mar	0,5	1,4	0,5	-1,6	-0,7	-1,6	0,9	0,5	0,4	-1,8	-0,8	2,3	-2,4	0,8	0,0	-0,4	2,4	-2,3	1,7
apr	-1,3	-0,8	-1,1	-1,0	-1,4	0,4	3,3	-1,2	-0,2	-0,3	2,4	-1,7	-0,7	0,7	0,3	0,9	0,7	1,8	-0,8
mag	0,7	-1,3	1,4	-1,6	1,4	0,2	1,4	-0,5	2,3	-1,0	1,7	-0,1	-2,2	-1,1	0,7	-0,9	1,0	0,3	-2,4
giu	-0,9	0,3	3,4	0,4	0,6	0,4	-0,7	-1,0	0,3	-1,1	-1,7	0,2	-1,5	-0,9	0,0	-0,9	1,9	0,5	0,8
lug	-0,8	-2,1	1,8	-0,3	-0,3	1,9	0,2	-0,9	-0,2	1,0	-2,6	-0,2	0,1	-2,9	3,2	0,4	0,6	0,6	0,5
ago	1,0	-2,4	3,6	1,2	-1,9	-1,8	-1,4	-0,4	1,7	-1,4	0,5	1,2	-0,4	-2,4	-0,3	0,4	1,5	1,2	0,1
set	-2,1	-1,7	-0,4	0,7	-0,1	1,4	-0,7	-1,0	1,0	-0,9	1,9	-0,2	0,1	-0,3	-1,1	2,0	-0,7	1,7	0,5
ott	2,0	-0,8	-2,4	0,9	-0,6	1,5	-0,4	0,5	-0,4	-2,0	-0,7	0,1	-0,1	1,2	-1,2	-1,0	0,8	1,1	1,4
nov	-1,1	1,0	-0,3	-0,1	-1,2	1,0	-1,1	-0,2	0,4	-0,4	-0,6	0,7	-0,4	1,3	0,0	0,2	-0,7	1,3	0,3
dic	1,8	-2,2	2,1	0,8	0,8	-1,8	1,3	0,0	-0,5	-1,5	-2,1	0,6	-1,2	-0,3	1,5	1,1	0,6	-1,5	0,4

4 Il Clima a Torino – scenari futuri

4.1 Considerazioni generali

Attraverso l'utilizzo della modellistica climatica (globale e regionale), e tenendo conto degli scenari di sviluppo socioeconomico e delle ipotesi sulle azioni di mitigazione dei gas serra che verranno intraprese, è possibile delineare degli scenari futuri relativi alle variabili climatiche. Le simulazioni sono affette da incertezze, dettate dalla limitata capacità dei modelli nel descrivere esplicitamente tutti i processi e le interazioni fra le variabili che influenzano il clima, inclusi i meccanismi di feed-back, dall'accuratezza degli scenari socio-economici, dalla rilevanza e dalla tempistica con cui verranno attuate le misure di mitigazione, nonché da altri fattori difficilmente prevedibili, come la crescita della popolazione, le migrazioni, le modifiche degli stili di vita, l'evoluzione tecnologica. Ciò nonostante è importante disporre di stime, anche quantitative, sul cambiamento del clima, al fine di valutare gli impatti, definire le azioni di contrasto puntuali e assegnare le priorità alle misure di prevenzione e protezione da intraprendere.

È importante che le proiezioni future delle variabili climatiche siano validate su un periodo detto "di controllo" rispetto ai dati osservati e vengano apportate opportune correzioni affinché la rappresentatività del modello sia assicurata, almeno nel periodo di controllo. L'applicazione delle tecniche di correzione anche al periodo futuro costituisce una ulteriore arbitrarietà che si attribuisce agli scenari, aumentandone l'incertezza.

4.2 Modellistica utilizzata

Nel presente rapporto sono state utilizzate le simulazioni ad alta risoluzione ottenute con il modello climatico regionale COSMO-CLM (a 8 km di risoluzione orizzontale) prodotte dal Centro Euro Mediterraneo per il Cambiamento Climatico (www.cmcc.it), le medesime simulazioni utilizzate per il Piano Nazionale di Adattamento al Cambiamento Climatico, in fase di approvazione da parte del Ministero per l'Ambiente e già utilizzate per lavori scientifici (P. Mercogliano et al, High-resolution climate simulations with COSMO-CLM over Italy: performance evaluation and climate projections for the 21st century, CMCC).

Utilizzando tali scenari, unitamente all'applicazione di tecniche di rimozione degli errori sistematici, è stato possibile effettuare delle valutazioni sull'andamento del clima a Torino nei prossimi decenni, fino a fine secolo.

Le simulazioni utilizzano come scenari globali le elaborazioni svolte dall'IPCC e i due scenari emissivi RCP 4.5 (intermedio, con azioni di mitigazione significative, che prevedono una stabilizzazione della concentrazione della CO₂ in atmosfera dopo la metà del secolo) e lo scenario RCP 8.5 (senza azioni di mitigazione), prendendo in considerazione il periodo temporale dai nostri giorni fino al 2100. Per quanto riguarda la significatività dei diversi scenari, è difficile fare una stima della diminuzione di emissioni in atmosfera che seguiranno gli impegni dei governi nazionali. Il recente rapporto dell'IPCC sulla necessità di contenere l'aumento di temperatura globale entro fine secolo al di sotto di 1.5°C, sostiene che gli impegni ad ora assunti non siano in grado di contenere l'aumento neanche al di sotto dei 2°C. Lo scenario più probabile ad oggi, anche se basato sull'ipotesi estrema di non ridurre le emissioni di gas climalteranti, più si avvicina a quello che potrebbe accadere a fine secolo. Dal punto di vista locale, confrontando gli incrementi di temperatura dal 1971 al 2019 stimati dai due scenari e quelli osservati sulla città di Torino, si osserva come per la temperatura massima la tendenza in questi 40 anni sia molto maggiore per l'osservato rispetto ai due scenari e sicuramente il valore più vicino è quello dello scenario RCP 8.5. Per la temperatura media entrambi gli scenari sovrastimano il trend, raddoppiandolo. Questo è dovuto in gran parte all'incremento della temperatura minima che è visto in aumento, mentre per l'osservato, abbiamo visto in precedenza che la tendenza è stazionaria.

	MEDIA	MASSIMA
osservata	0,22	0,91
RCP 4.5	0,52	0,54
RCP 8.5	0,55	0,72

4.3 Analisi delle temperature nello scenario RCP4.5

Dopo un'analisi riguardante la bontà dei dati del modello nella riproduzione del clima passato e presente, sono stati esaminati i dati dello scenario RCP4.5, concentrandosi in particolare su Torino. Sono stati calcolati i valori di temperatura media, minima e massima media del periodo di controllo 1971-2005 e dei periodi di trent'anni successivi 2011-2040, 2041-2070 e 2071-2100.

Le analisi riportate sono state ottenute applicando una correzione di bias ai dati del modello in modo da eliminare l'errore sistematico presente. Tale correzione fornisce ottimi risultati sia per i valori medi sia per gli estremi della distribuzione.

La Figura 51 fornisce una visione complessiva degli andamenti delle temperature medie, massime e minime annuali dal 1971 al 2100 derivate dalla modellistica climatica.

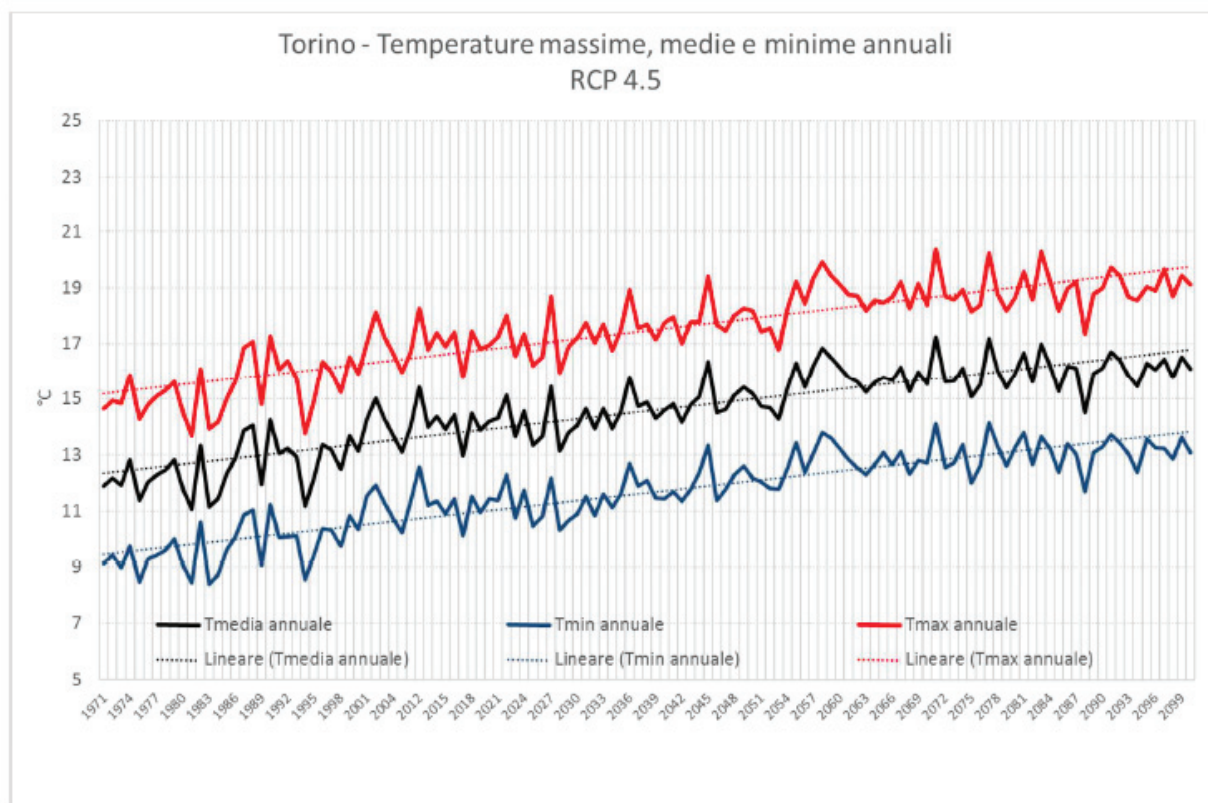


Figura 51 Andamento delle temperature medie, massime e minime annuali e rispettive linee di tendenza dello scenario RCP 4.5.

Per dare una valutazione più quantitativa e affidabile delle proiezioni future, le figure 52-54 mostrano i trend di temperatura calcolati sul recente passato e sul periodo futuro, considerando gli intervalli di confidenza.

Da segnalare che dopo la rimozione degli errori sistematici del modello climatico, test statistici non parametrici hanno confermato il buon l'accordo tra le simulazioni e le osservazioni nel passato. Inoltre, gli incrementi dei dati di temperatura sono risultati tutti statisticamente significativi (livello confidenza al 0.95).

Nel dettaglio, la Figura 52 rappresenta l'andamento della temperatura media annuale nello scenario RCP4.5. Dal 1971 al 2005 (periodo di controllo, in blu) l'incremento è stato di circa mezzo grado ogni dieci anni ($0,58^{\circ}\text{C}/10\text{y}$), mentre nelle proiezioni future si stima un aumento complessivo dei valori di quasi 3°C al 2100 con un tasso di incremento di $0,29^{\circ}\text{C}$ ogni 10 anni.

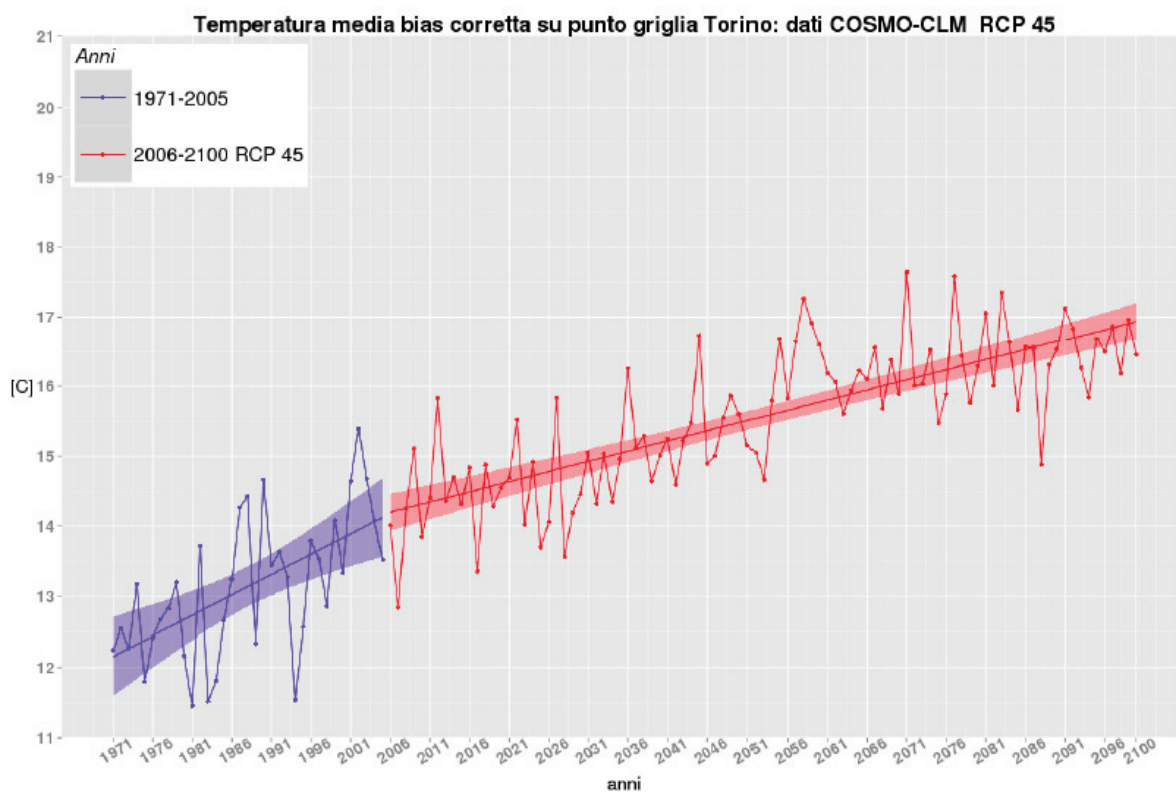


Figura 52 Andamento delle temperature medie annuali e rispettive linee di tendenza dello scenario RCP 4.5.

La Figura 53 rappresenta l'andamento della temperatura massima annuale nello scenario RCP4.5. Dal 1971 al 2005 (periodo di controllo, in blu) l'incremento è stato di poco superiore al mezzo grado ogni dieci anni ($0,6^{\circ}\text{C}/10\text{y}$), mentre nelle proiezioni future si stima un aumento complessivo dei valori di quasi 3°C al 2100 con un tasso di incremento di $0,3^{\circ}\text{C}$ ogni 10 anni.

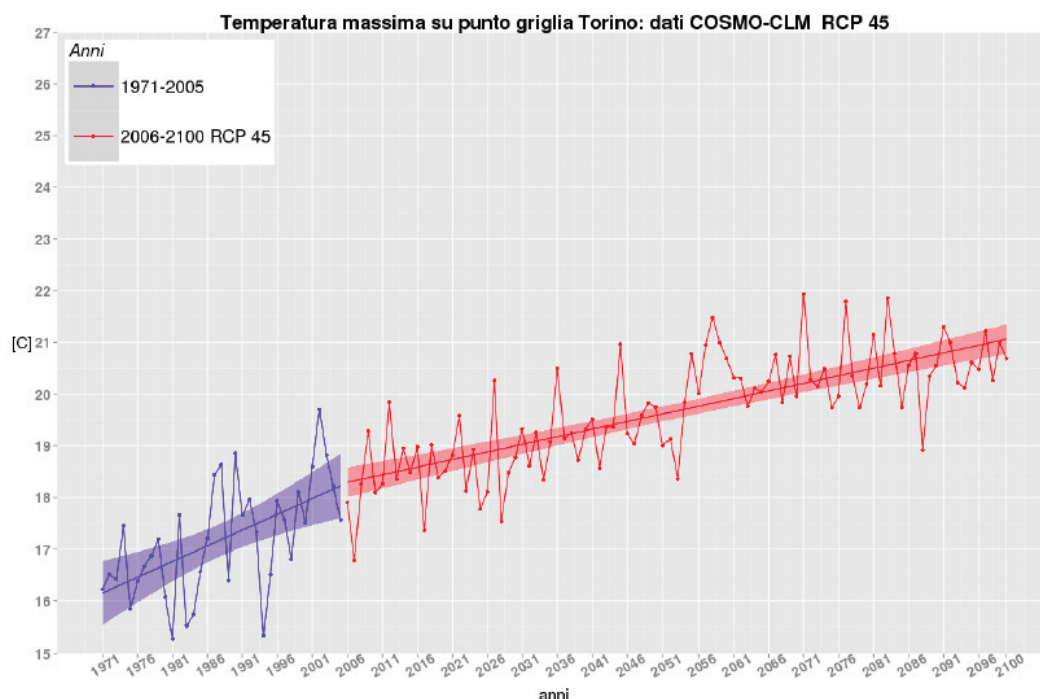


Figura 53 Andamento delle temperature massime annuali e rispettive linee di tendenza dello scenario RCP 4.5.

La Figura 54 rappresenta l'andamento della temperatura minima annuale nello scenario RCP4.5. Dal 1971 al 2005 (periodo di controllo, in blu) l'incremento è stato di poco superiore al mezzo grado ogni dieci anni ($0,56^{\circ}\text{C}/10\text{y}$), mentre nelle proiezioni future si stima un aumento complessivo dei valori di quasi 3°C al 2100 con un tasso di incremento di $0,29^{\circ}\text{C}$ ogni 10 anni.

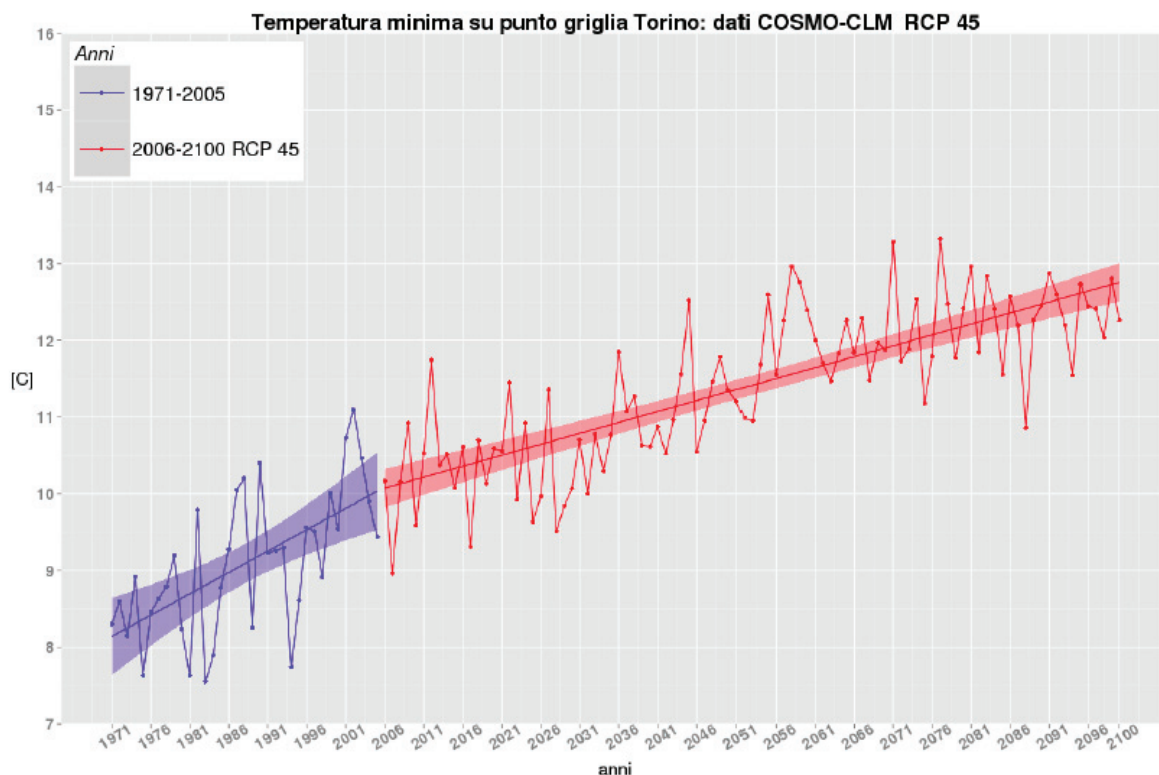


Figura 54 Andamento delle temperature minime annuali e rispettive linee di tendenza dello scenario RCP 4.5.

Utilizzando le simulazioni ottenute dal modello climatico COSMO-CLM si sono confrontate le distribuzioni della temperatura massima estiva della città di Torino nel periodo di controllo del modello (1971–2005) e nei tre periodi futuri 2011–2040, 2041–2070, 2071–2100, con lo scopo di valutare eventuali variazioni nelle code della distribuzione (corrispondenti ai valori estremi).

Proprio perché di interesse per i valori estremi, è stata analizzata la variazione dei percentili per la stagione che più risente degli estremi di temperature: il periodo estivo.

La Figura 55 mostra la distribuzione delle temperature massime a Torino, nel periodo estivo, per i dati osservati, i valori stimati da modello nel periodo di controllo con la correzione del bias e i valori stimati da modello nello scenario futuro. Si osserva un buon accordo tra la temperatura osservata e quella simulata dal modello nel periodo di controllo 1971–2005 e un deciso spostamento dell'intera distribuzione verso destra per il futuro, il che evidenzia un aumento non solo del valor medio, ma anche dei percentili più elevati.

Temperatura massima JJA bias corretta su Torino :COSMO-CLM 1px e dati osservati

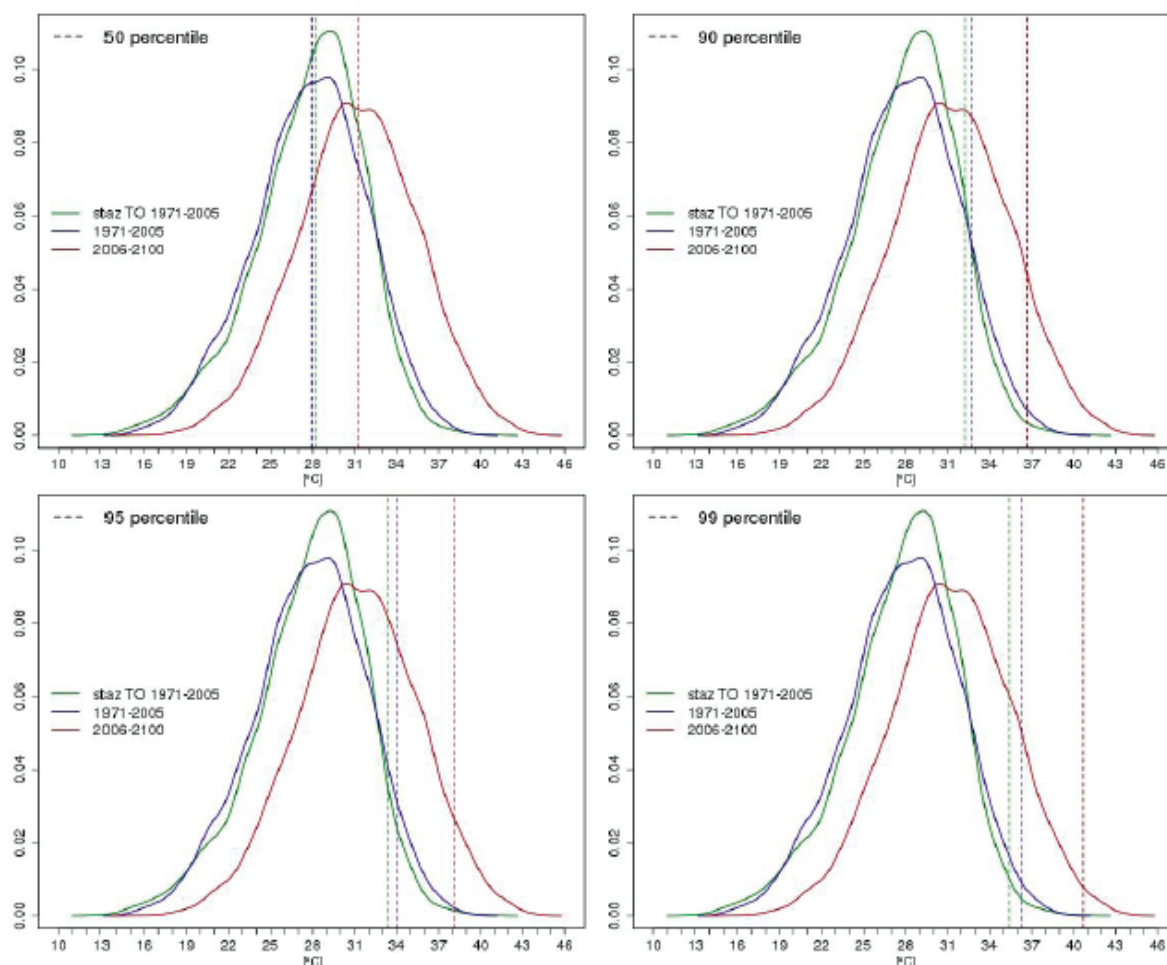


Figura 55 Distribuzione della Temperatura massima (bias corretta) nel periodo estivo (JJA) nei periodi 1971–2005 (blu) e 2006–2100 (rosso). In verde le temperature osservate.

Nella Figura 56 è rappresentato il medesimo confronto effettuato sulla temperatura minima estiva. Anche in questo caso, si può notare un generale aumento dei valori, analogo a quello riscontrato per i valori massimi.

Temperatura massima JJA bias corretta su Torino :COSMO-CLM 1px e dati osservati

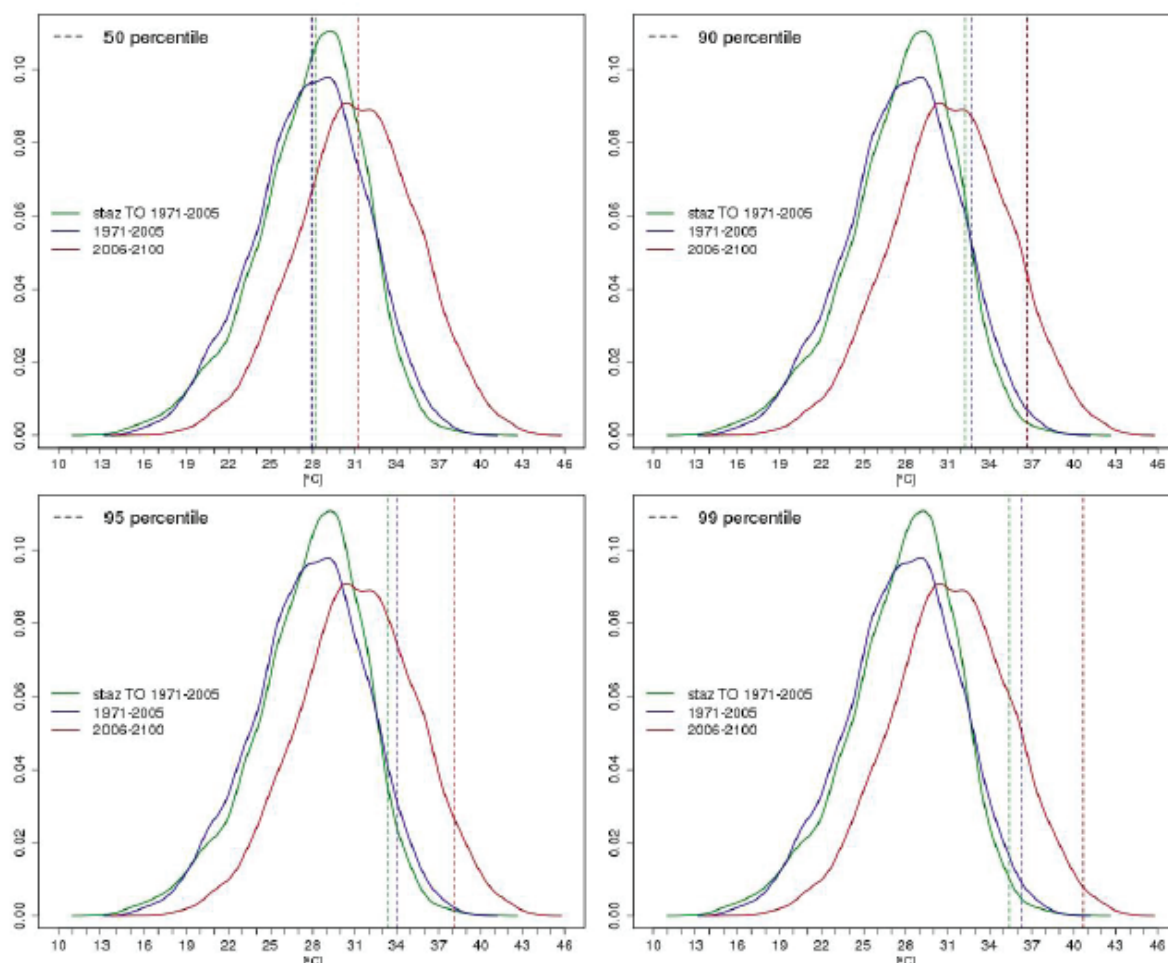


Figura 56 Distribuzione della Temperatura minima (bias corretta) nel periodo estivo (JJA) nei periodi 1971-2005 (blu) e 2006-2100 (rosso). In verde le temperature osservate.

In generale si assiste all'aumento di tutti i percentili verso valori maggiori: questo non comporta un appiattimento della curva ma un vero e proprio spostamento verso destra (per esempio il 95° percentile della temperatura massima estiva passa da 34.06 °C a 38.16 °C tra il periodo di controllo e lo scenario futuro), con conseguente aumento del numero di giorni di disagio per la popolazione.

Per sintetizzare le informazioni fornite dall'analisi delle distribuzioni di temperatura estiva, nelle tabelle sottostanti sono stati riportati i valori della mediana e del 90°, 95° e 99° percentile delle distribuzioni di temperatura massima e minima nel periodo di controllo e negli scenari futuri.

TMAX ESTIVA	50° percentile	90° percentile	95° percentile	99° percentile
1971 – 2005 osservazioni	28.2 °C	32.2 °C	33.4 °C	35.4 °C
1971 – 2005 controllo	27.9 °C	32.7 °C	34.1 °C	36.3 °C
2006-2100 scenario	31.2 °C	36.7 °C	38.2 °C	40.7°C

TMIN ESTIVA	50° percentile	90° percentile	95° percentile	99° percentile
1971 – 2005 osservazioni	18 °C	21.4 °C	22.4 °C	24 °C
1971 – 2005 controllo	17.9 °C	22.1 °C	23.2 °C	24.8 °C
2006-2100 scenario	20.7 °C	25.5 °C	26.7 °C	28.5°C

Analizzando i tre periodi trentennali (2011-2040, 2041-2070 e 2071-2100) singolarmente si osserva che l'aumento maggiore, per tutti i percentili della distribuzione, si ha nel periodo intermedio 2041- 2070, mentre l'aumento atteso a fine secolo è decisamente inferiore.

Da un punto di vista diverso, le medesime elaborazioni sui percentili consentono di vedere come, negli scenari futuri, i valori estremi della distribuzione si proporranno con maggiore frequenza. Le tabelle sottostanti indicano che percentili diventeranno i percentili 50°, 90°, 95°, 99° della distribuzione del periodo 1971-2005 (ad esempio il valore estremo del clima attuale, che si presenta solo l'1% delle volte, nel clima futuro si presenterà con una frequenza del 12%).

TMIN ESTIVA	50° percentile 1971 – 2005	90° percentile 1971 – 2005	95° percentile 1971 – 2005	99° percentile 1971 – 2005
2006-2100 scenario	22° percentile	63° percentile	74° percentile	88° percentile

TMAX ESTIVA	50° percentile 1971 – 2005	90° percentile 1971 – 2005	95° percentile 1971 – 2005	99° percentile 1971 – 2005
2006-2100 scenario	22° percentile	64° percentile	74° percentile	86° percentile

Considerando l'intero anno i percentili mostrano le variazioni indicate nelle tabelle seguenti. Il valore estremo della distribuzione della temperatura massima annuale, che si presenta solo 1% dei giorni, passa da 33.7°C a 39.5°C.

TMIN ANNUALE	50° percentile	90° percentile	95° percentile	99° percentile
1971 – 2005 osservazioni	9 °C	19 °C	20.3 °C	22.7 °C
1971 – 2005 controllo	9 °C	19.6 °C	21.3 °C	23.9 °C
2006-2100 scenario	10,7 °C	22,5 °C	24.4 °C	27.4 °C

TMAX ANNUALE	50° percentile	90° percentile	95° percentile	99° percentile
1971 – 2005 osservazioni	17.8 °C	29.4 °C	31.1 °C	33.7 °C
1971 – 2005 controllo	17.9 °C	30.3 °C	32.4 °C	35.4 °C
2006-2100 scenario	19.6 °C	33.7 °C	36 °C	39.5 °C

Al fine di caratterizzare meglio, dal punto di vista del disagio per caldo, l'incremento delle temperature estive, sono stati calcolati alcuni indicatori climatici per il periodo estivo (JJA), nel periodo di riferimento e negli scenari futuri. Nello specifico è stato valutato l'andamento dell'Humidex, del Discomfort Intex, della temperatura massima apparente, del numero di giorni e di notti tropicali a livello trentennale, sempre considerando il periodo JJA, identificando il numero dei superamenti delle soglie critiche nei diversi periodi di futuri (Figura 57).

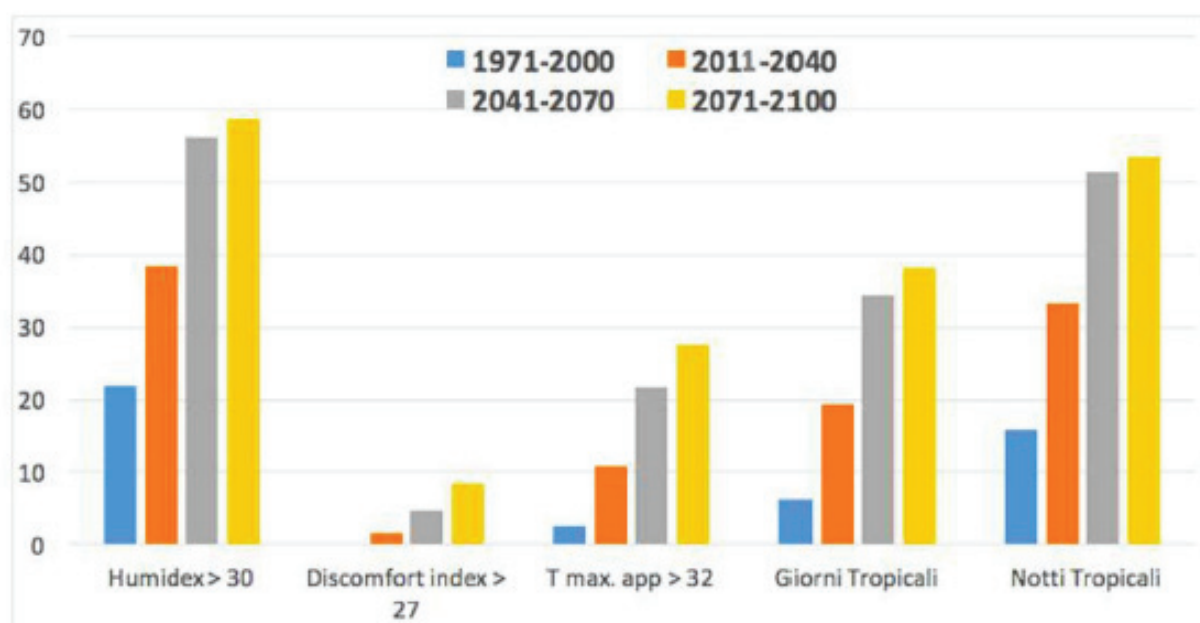


Figura 57 Confronto indici biometeorologici di periodi trentennali negli scenari futuri e sul periodo di controllo utilizzando i dati dello scenario RCP 4.5 per il periodo JJA.

Dalla Figura 57 si nota che i primi due archi temporali presi in analisi (in arancione e grigio) evidenziano un trend in aumento, rispetto al trentennio precedente, simile. Infatti, gli indicatori nel periodo 2011–2040 sembrano raddoppiare in frequenza rispetto al periodo di controllo. Considerando invece l'arco temporale 2041–2070, viene evidenziata una triplicazione rispetto al 1971-2000.

Nel terzo trentennio emerge un aumento molto più limitato, legato alla stabilizzazione della temperatura prevista dallo scenario RCP 4.5.

La tabella sottostante riepiloga la frequenza di superamento delle soglie per i vari indici nel periodo di riferimento e nei periodi futuri.

Tabella 5 - Numero di giorni estivi in cui gli indici biometeorologici superano le soglie indicate e numero di giorni e notti tropicali per il periodo di riferimento 1971-2000 e per gli scenari futuri.

	humidex>30	Discomfort index>27	temp max app>32	giorni tropicali	notti tropicali
1971-2000	22	0	3	6	16
2010-2040	38	2	11	19	33
2041-2070	56	5	22	34	51
2071-2100	59	9	28	38	53

Tabella 6 - Differenza dei valori dei giorni estivi in cui gli indici biometeorologici superano le soglie indicate e numero di giorni e notti tropicali rispetto al periodo di riferimento 1971-2000.

	humidex>30	Discomfort index>27	temp max app>32	giorni tropicali	notti tropicali
1971-2000	22	0	3	6	16
2010-2040	38	2	11	19	33
2041-2070	56	5	22	34	51
2071-2100	59	9	28	38	53

4.4 Analisi temperature scenario RCP 8.5

Anche per lo scenario RCP 8.5 sono stati calcolati i valori di temperatura media, minima e massima media del periodo di controllo 1971-2005 e dei periodi di trent'anni successivi 2011-2040 e 2041-2070. La Figura 58 fornisce una visione complessiva degli andamenti delle temperature medie, massime e minime annuali dal 1971 al 2100 fornite dalla modellistica climatica. Come si evince dal grafico le temperature tendono ad aumentare fino a fine secolo, con una tendenza più accentuata per le temperature massime. Tale aumento e il tasso di crescita rimangono rilevanti fino a fine secolo, coerentemente con lo scenario emissivo che non prevede la stabilizzazione della concentrazione della CO₂ in atmosfera nel corso del XXI secolo.

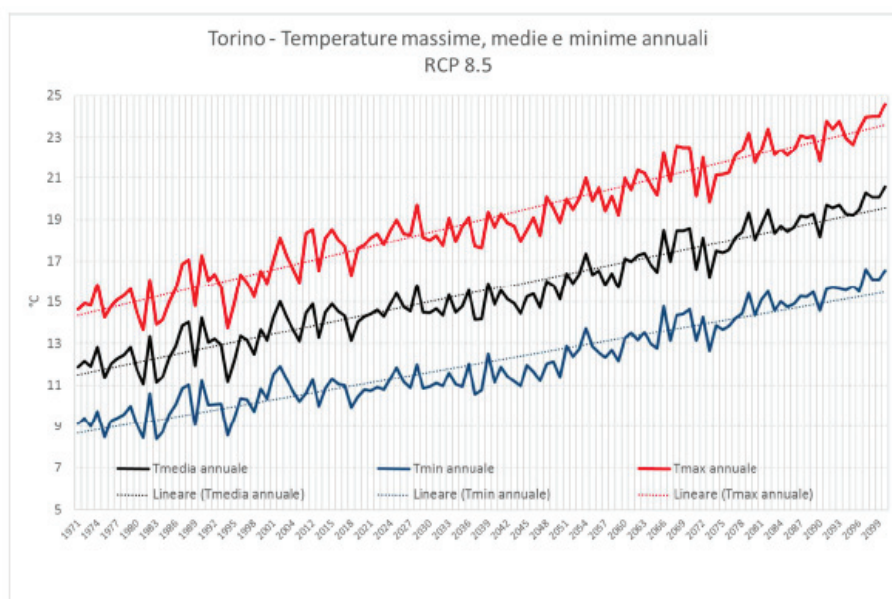


Figura 58 Andamento delle temperature medie, massime e minime annuali e rispettive linee di tendenza dello scenario RCP 8.5.

Anche con lo scenario RCP 8.5, per dare una valutazione più quantitativa e affidabile delle proiezioni future, nelle figure successive sono mostrati i trend di temperatura calcolati sul recente passato e sul periodo futuro, considerando gli intervalli di confidenza.

Nel dettaglio, la Figura 59 rappresenta l'andamento della temperatura media annuale nello scenario RCP8.5. Come abbiamo già verificato, dal 1971 al 2005 (periodo di controllo) l'incremento è stato di circa 0.15°C ogni 10 anni, mentre nelle proiezioni future si stima un aumento complessivo dei valori di quasi 6.5°C al 2100 con un tasso di incremento di 0.68°C ogni 10 anni.

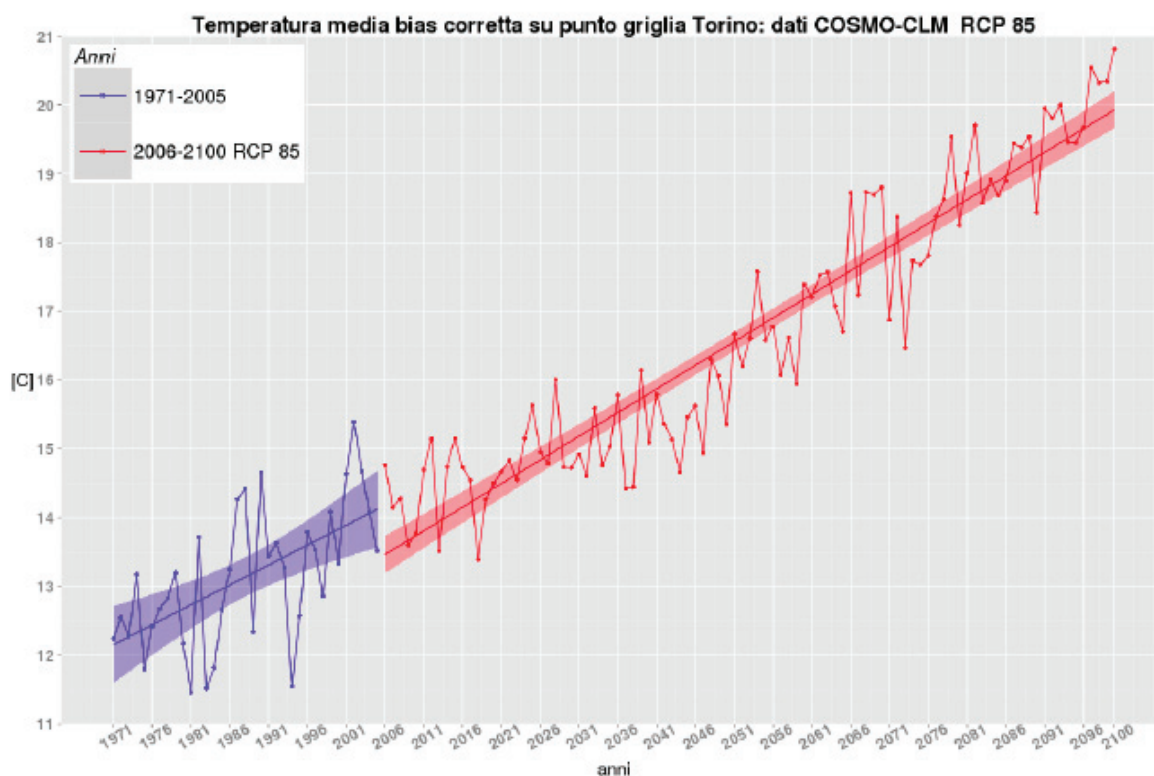


Figura 59 Andamento delle temperature medie annuali e rispettive linee di tendenza dello scenario RCP 8.5.

La Figura 60 rappresenta l'andamento della temperatura massima annuale nello scenario RCP8.5. Dal 1971 al 2005 (periodo di controllo, in blu) l'incremento è stato di poco superiore al mezzo grado ogni dieci anni (0,6°C/10y), mentre nelle proiezioni future si stima un aumento complessivo dei valori di quasi 6.7°C al 2100 con un tasso di incremento di 0.7°C ogni 10 anni.

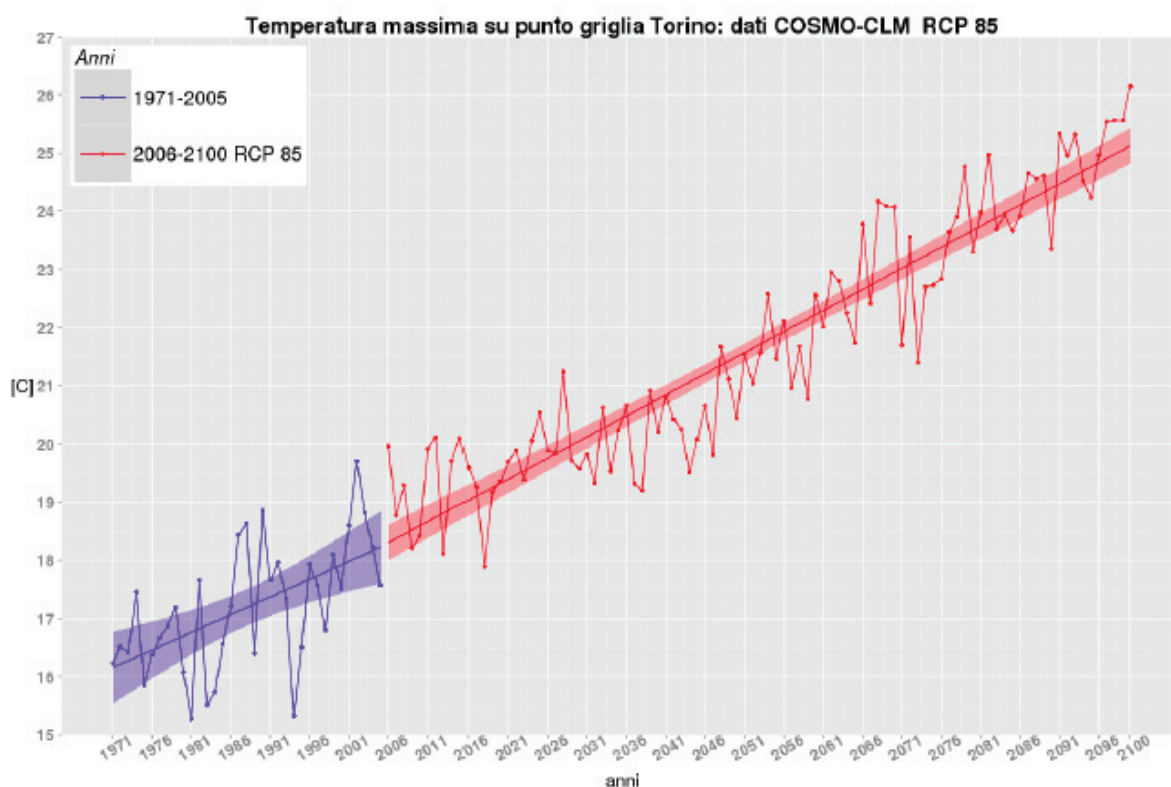


Figura 60 Andamento delle temperature massime annuali e rispettive linee di tendenza dello scenario RCP 8.5.

La Figura 61 l'andamento della temperatura minima annuale nello scenario RCP8.5. Dal 1971 al 2005 (periodo di controllo, in blu) l'incremento è stato di poco superiore al mezzo grado ogni dieci anni ($0,56^{\circ}\text{C}/10\text{y}$), mentre nelle proiezioni future si stima un aumento complessivo dei valori di quasi 6°C al 2100 con un tasso di incremento di $0,63^{\circ}\text{C}$ ogni 10 anni.

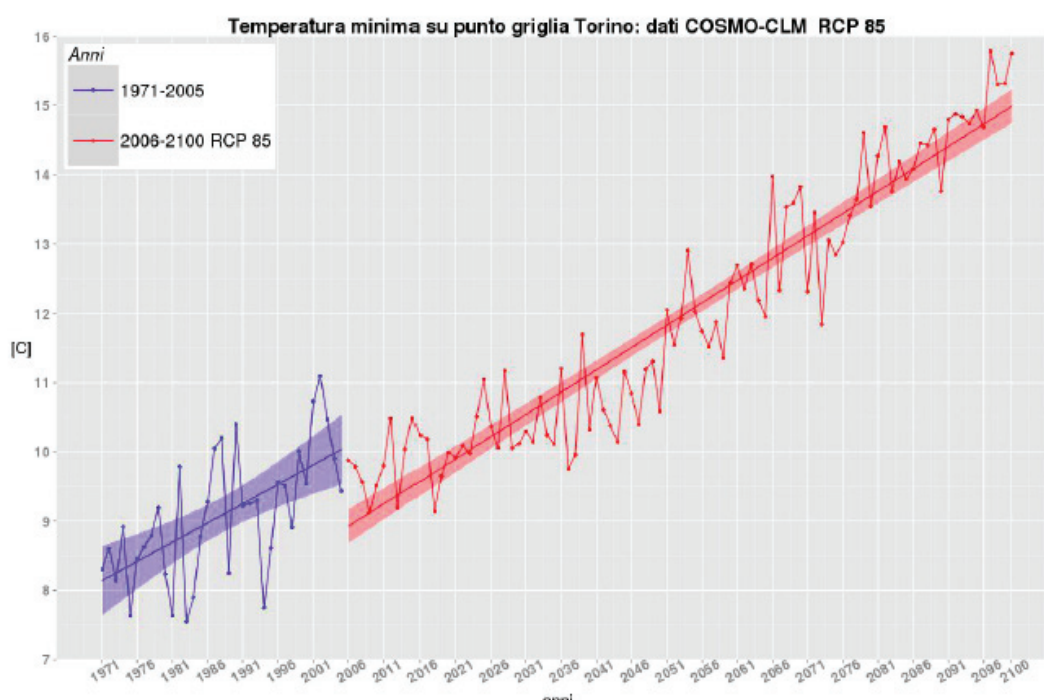


Figura 61 Andamento delle temperature minime annuali e rispettive linee di tendenza dello scenario RCP 8.5.

Anche per lo scenario RCP 8.5, utilizzando le simulazioni ottenute dal modello climatico COSMOCLM, sono state confrontate le distribuzioni della temperatura massima estiva della città di Torino nel periodo di controllo del modello (1971–2005) e nei tre periodi futuri 2011– 2040, 2041–2070, 2071– 2100, con lo scopo di valutare eventuali variazioni nelle code della distribuzione (corrispondenti ai valori estremi).

Proprio perché di interesse per i valori estremi, è stata analizzata la variazione dei percentili per la stagione che più risente degli estremi di temperature: il periodo estivo.

La Figura 62 mostra la distribuzione delle temperature massime a Torino, nel periodo estivo, per i dati osservati, i valori stimati da modello nel periodo di controllo con la correzione del bias e i valori stimati da modello nello scenario futuro. Si osserva un deciso spostamento dell'intera distribuzione verso destra per il futuro, il che evidenzia un aumento non solo del valor medio, ma anche dei percentili più elevati. Il valore medio tenderà a presentarsi con una frequenza inferiore, mentre gli estremi saranno più probabili, a conferma anche di una maggiore variabilità del clima futuro.

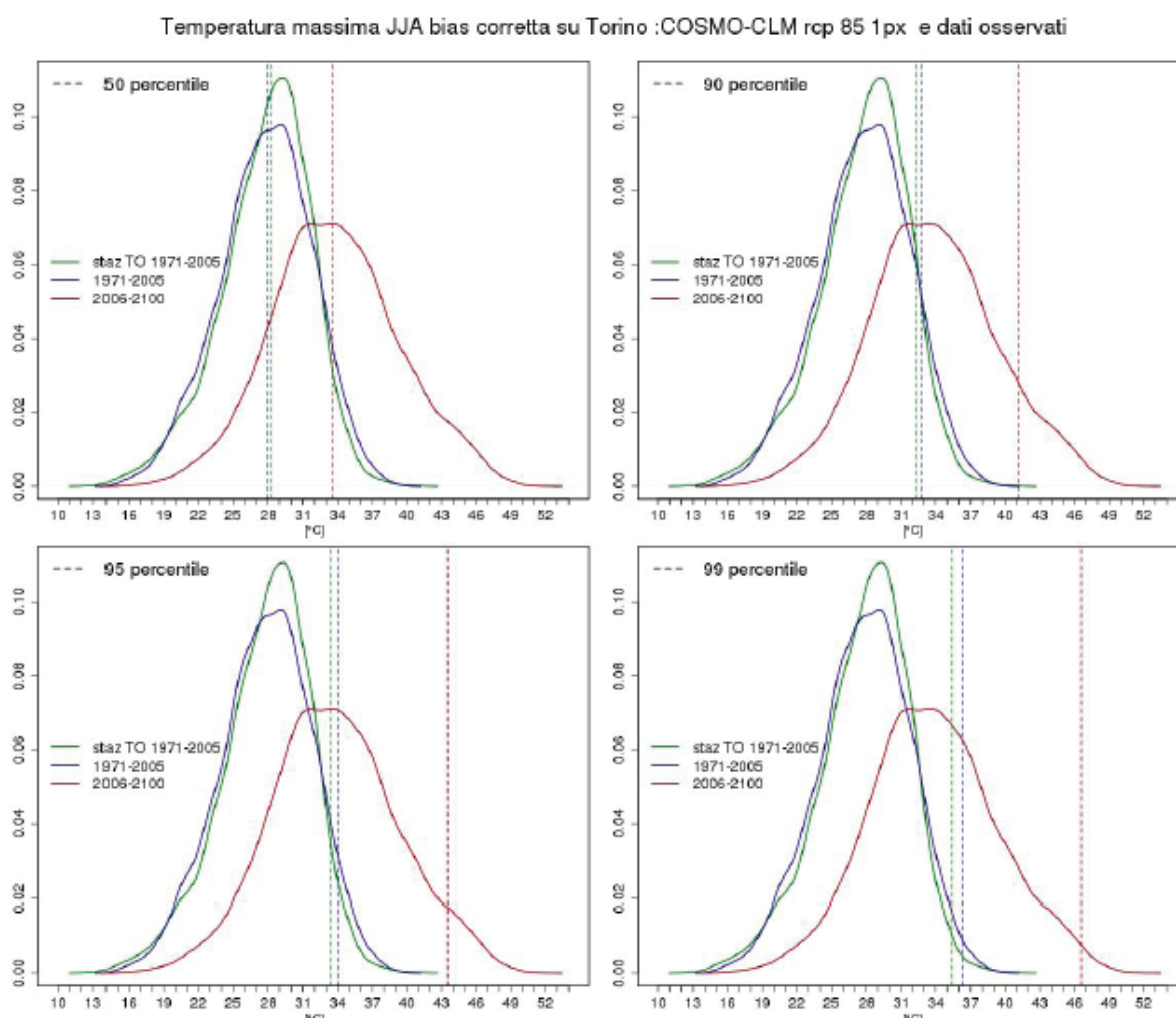


Figura 62 Distribuzione della Temperatura massima (bias corretta) nel periodo estivo (JJA) nei periodi 1971–2005 (blu) e 2006–2100 (rosso). In verde le temperature osservate.

Nella Figura 63 è rappresentato il medesimo confronto effettuato sulla temperatura minima estiva. Anche in questo caso, si può notare un generale aumento dei valori, analogo a quello riscontrato per i valori massimi.

Temperatura minima JJA bias corretta su Torino :COSMO-CLM 1px e dati osservati

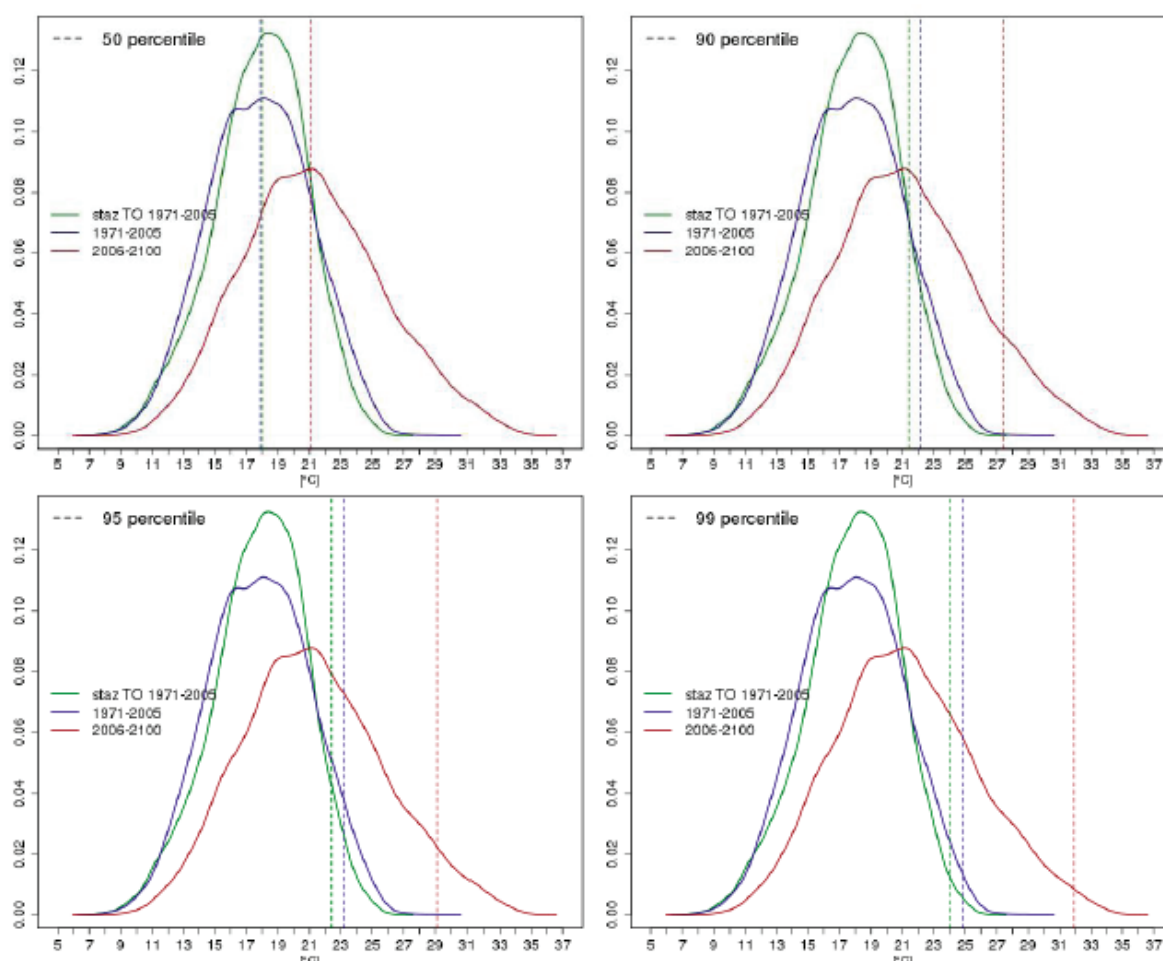


Figura 63 Distribuzione della Temperatura minima (bias corretta) nel periodo estivo (JJA) nei periodi 1971–2005 (blu) e 2006–2100 (rosso). In verde le temperature osservate.

In generale si assiste all'aumento di tutti i percentili verso valori maggiori e un appiattimento della curva: lo spostamento verso destra della distribuzione (per esempio il 95° percentile della temperatura massima estiva passa da 34.06 °C a 43.6 °C tra il periodo di controllo e lo scenario futuro), con conseguente aumento del numero di giorni di disagio per la popolazione. Per sintetizzare le informazioni fornite dall'analisi delle distribuzioni di temperatura estiva, nelle tabelle sottostanti sono stati riportati i valori della mediana e del 90°, 95° e 99° percentile delle distribuzioni di temperatura massima e minima nel periodo di controllo e negli scenari futuri.

TMAX ESTIVA	50° percentile	90° percentile	95° percentile	99° percentile
1971 – 2005 osservazioni	28.2 °C	32.2 °C	33.4 °C	35.4 °C
1971 – 2005 controllo	27.9 °C	32.7 °C	34.1 °C	36.3 °C
2006-2100 scenario	33.6 °C	41.2 °C	43.5 °C	46.5°C

TMIN ESTIVA	50° percentile	90° percentile	95° percentile	99° percentile
1971 – 2005 osservazioni	18 °C	21.4 °C	22.4 °C	24 °C
1971 – 2005 controllo	17.9 °C	22.1 °C	23.2 °C	24.8 °C
2006-2100 scenario	21.0 °C	27.4 °C	29.1 °C	31.9°C

Analizzando i tre periodi trentennali (2011-2040, 2041-2070 e 2071-2100) singolarmente si osserva che l'aumento per tutti i percentili della distribuzione rimane pressoché costante in tutti periodi trentennali considerati, facendo raggiungere valori a fin secolo decisamente rilevanti.

Da un punto di vista diverso, le medesime elaborazioni sui percentili consentono di vedere come, negli scenari futuri, i valori estremi della distribuzione si proporranno con maggiore frequenza. Le tabelle sottostanti indicano che percentili diventeranno i percentili 50°, 90°, 95°, 99° della distribuzione del periodo 1971-2005 (ad esempio il valore estremo della temperatura minima attuale, che si presenta solo l'1% delle volte, nel clima futuro si presenterà con una frequenza del 21% e, per quanto riguarda la temperatura massima, la mediana del nuovo clima corrisponderà circa al valore che oggi si presenta solo il 5% delle volte).

TMIN ESTIVA	50° percentile 1971 – 2005	90° percentile 1971 – 2005	95° percentile 1971 – 2005	99° percentile 1971 – 2005
2006-2100 scenario	23° percentile	60° percentile	68° percentile	79° percentile

TMAX ESTIVA	50° percentile 1971 – 2005	90° percentile 1971 – 2005	95° percentile 1971 – 2005	99° percentile 1971 – 2005
2006-2100 scenario	14° percentile	44° percentile	53° percentile	69° percentile

Considerando l'intero anno i percentili mostrano le variazioni indicate nelle tabelle seguenti. Il valore estremo della distribuzione della temperatura massima annuale, che si presenta solo 1% dei giorni, passa da 33.7°C a 45.0°C.

TMIN ANNUALE	50° percentile	90° percentile	95° percentile	99° percentile
1971 – 2005 osservazioni	9 °C	19 °C	20.3 °C	22.7 °C
1971 – 2005 controllo	9 °C	19.6 °C	21.3 °C	23.9 °C
2006-2100 scenario	11.1 °C	23.2 °C	27.7 °C	30.1°C

TMAX ANNUALE	50° percentile	90° percentile	95° percentile	99° percentile
1971 – 2005 osservazioni	17.8 °C	29.4 °C	31.1 °C	33.7 °C
1971 – 2005 controllo	17.9 °C	30.3 °C	32.4 °C	35.4 °C
2006-2100 scenario	21.3 °C	36.5 °C	39.6 °C	45.0°C

4.5 Analisi precipitazioni scenario RCP4.5

I dati di precipitazione dello scenario RCP4.5 sono stati utilizzati per valutare l'andamento del numero di giorni con precipitazioni ≥ 1 mm, ≥ 5 mm, ≥ 10 mm e ≥ 20 mm nel periodo 1971-2005 (periodo di controllo) e nei periodi 2011-2040, 2041-2070, 2071-2100 (Figura 64).

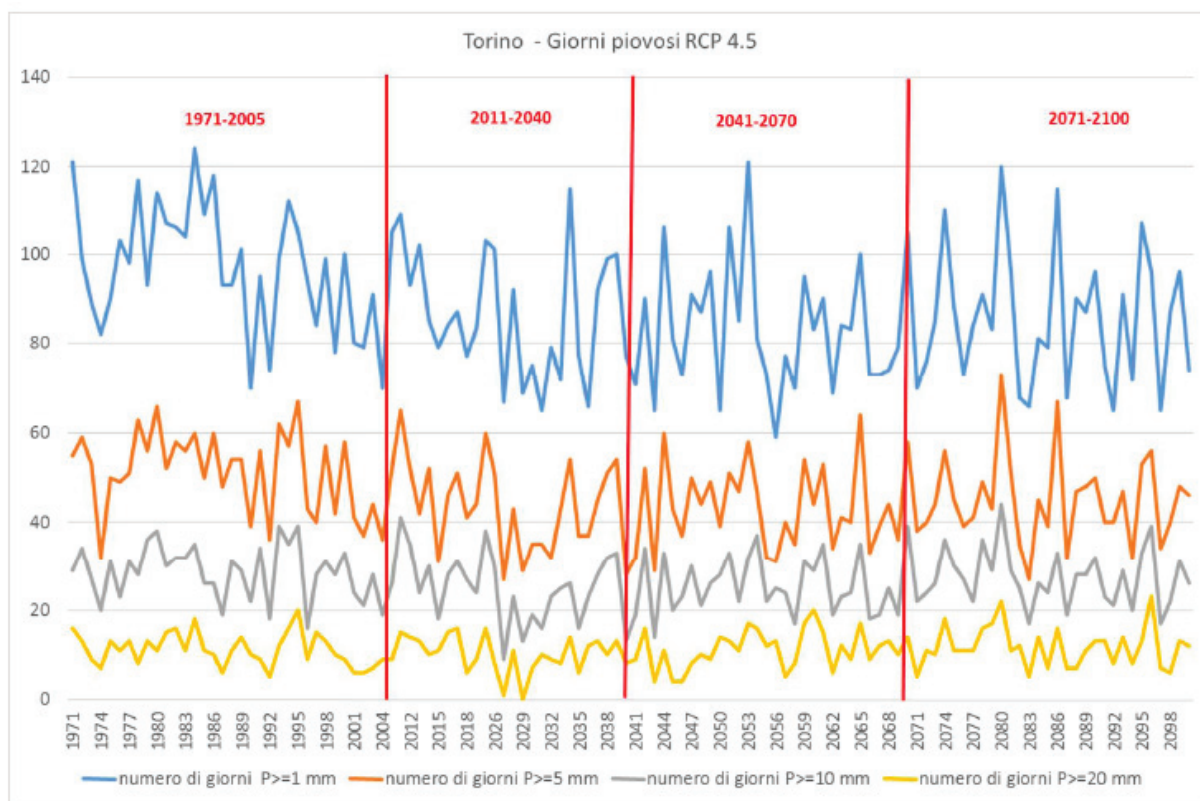


Figura 64 Numero di giorni con precipitazioni ≥ 1 mm, ≥ 5 mm, ≥ 10 mm e ≥ 20 mm secondo lo scenario RCP4.5.

Se si considera il numero di giorni piovosi si osserva una tendenza alla diminuzione rispetto al periodo 1971-2005 (Tabella 7).

Tabella 7 - Valori medi del numero di gg piovosi dei periodi 1971-2005, 2011-2040, 2041-2070, 2071-2100 secondo lo scenario RCP4.5.

scenario RCP 4.5	n° giorni piovosi
1971-2005	97
2011-2040	86
2041-2070	84
2071-2100	85

Analizzando il ciclo stagionale della pioggia si può notare che i mesi più piovosi sono maggio e ottobre, meno piovosi risultano i mesi estivi soprattutto negli anni a partire dal 2011 (Figura 65).

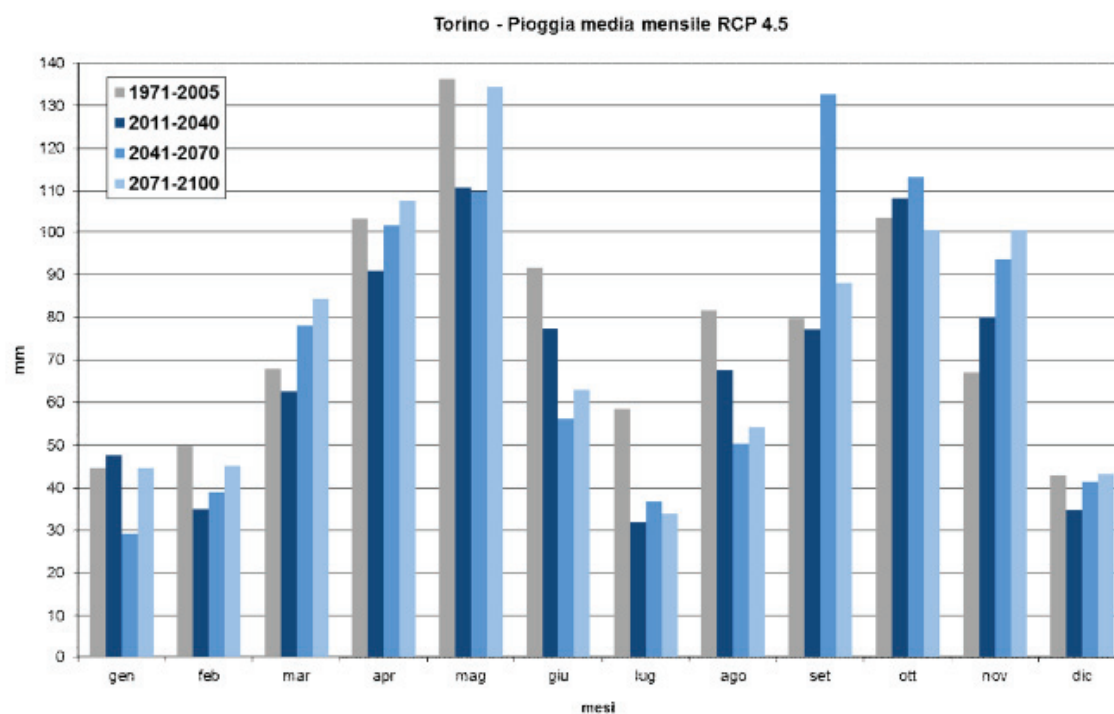


Figura 65 Pioggia media mensile dei periodi 1971-2005, 2011-2040, 2041-2070, 2071-2100 secondo lo scenario RCP4.5.

La pioggia annuale media nei periodi 2011-2040 e 2041-2070 è in leggera diminuzione, mentre risulta in aumento nel periodo 2071-2100.

Tabella 8 Precipitazione media annua dei periodi 1971-2000, 2011-2040, 2041-2070, 2071-2100 secondo lo scenario RCP4.5.

scenario RCP 4.5	precipitazione media (mm)
1971-2005	927
2011-2040	824
2041-2070	882
2071-2100	900

Le stesse considerazioni sono supportate dalle informazioni fornite dai grafici di Figura 66 e Figura 67: nel periodo 2041-2100 sembrano aumentare le precipitazioni di intensità da moderata a forte.

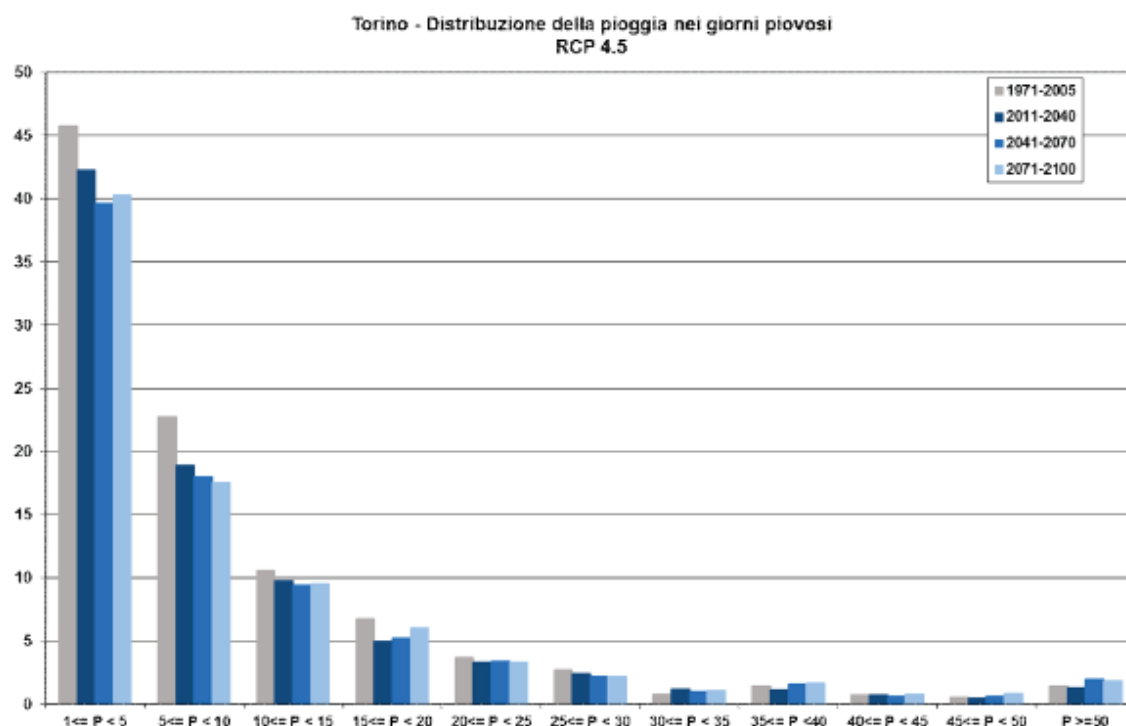


Figura 66 Distribuzione della pioggia nei giorni piovosi per i periodi 1971-2005, 2011-2040, 2041-2070, 2071- 2100 secondo lo scenario RCP4.5.

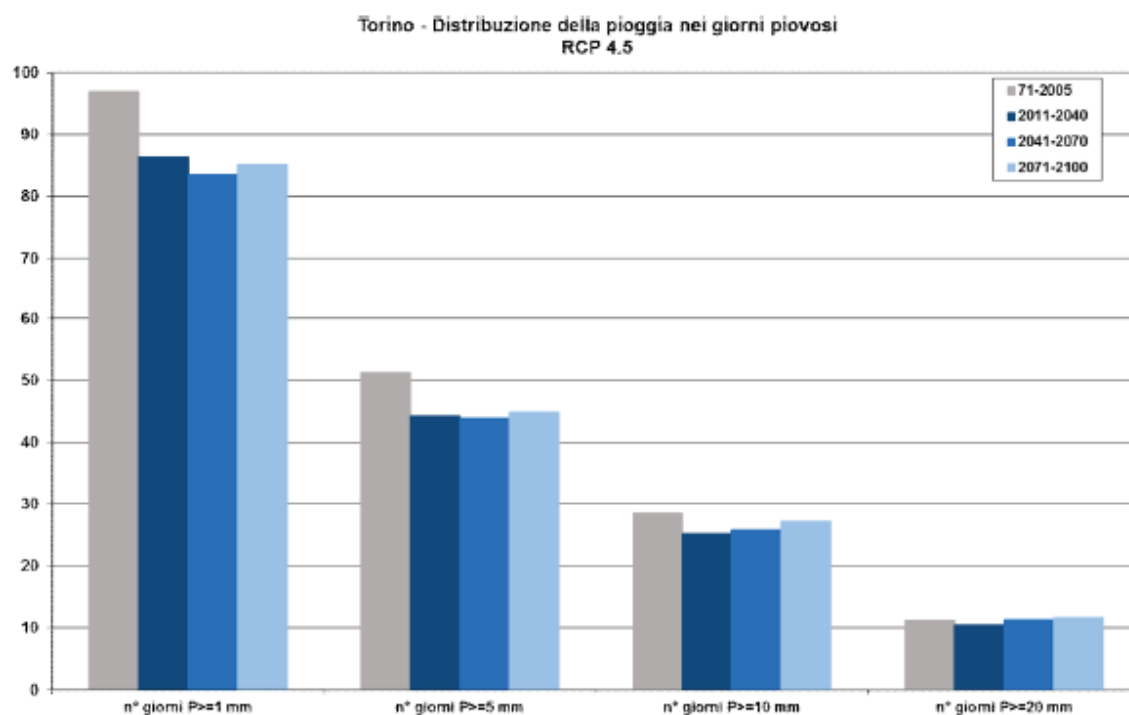


Figura 67 Distribuzione della pioggia nei giorni piovosi per i periodi 1971-2005, 2011-2040, 2041-2070, 2071- 2100 secondo lo scenario RCP4.5, utilizzando le soglie $P \geq 1$ mm, $P \geq 5$ mm, $P \geq 10$ mm e $P \geq 20$ mm.

Se si analizza l'anomalia di precipitazione annuale dal 1971 al 2100, calcolata rispetto al periodo di riferimento 1971-2000, si evince una tendenza alla diminuzione delle precipitazioni più marcata negli scenari futuri (Figura 68)

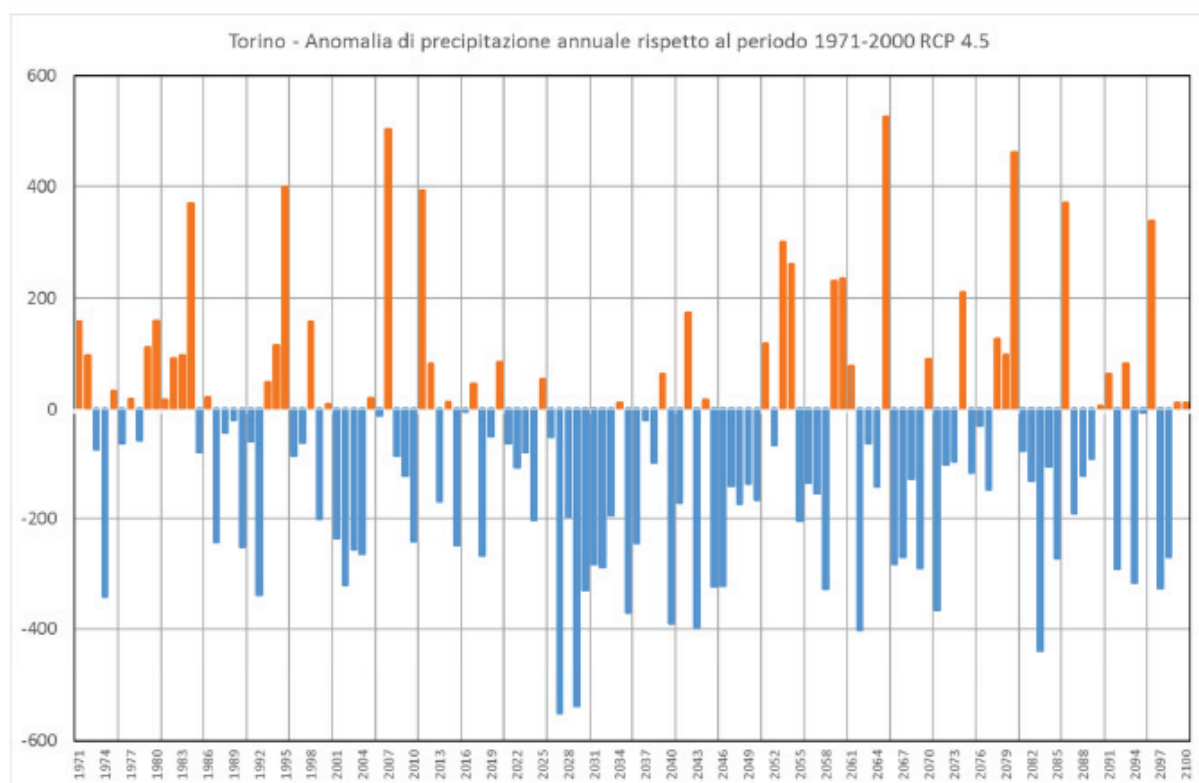


Figura 68 Anomalia di precipitazione annuale dal 1971 al 2100 rispetto al periodo 1971-2000 secondo lo scenario RCP4.5.

4.6 Analisi precipitazioni scenario RCP8.5

Anche i dati di precipitazione dello scenario RCP8.5 sono stati utilizzati per valutare l'andamento del numero di giorni con precipitazioni $\geq 1\text{mm}$, $\geq 5\text{mm}$, $\geq 10\text{ mm}$ e $\geq 20\text{ mm}$ nel periodo 1971-2005 (periodo di controllo) e nei periodi 2011-2040, 2041-2070, 2071-2100 (Figura 69).

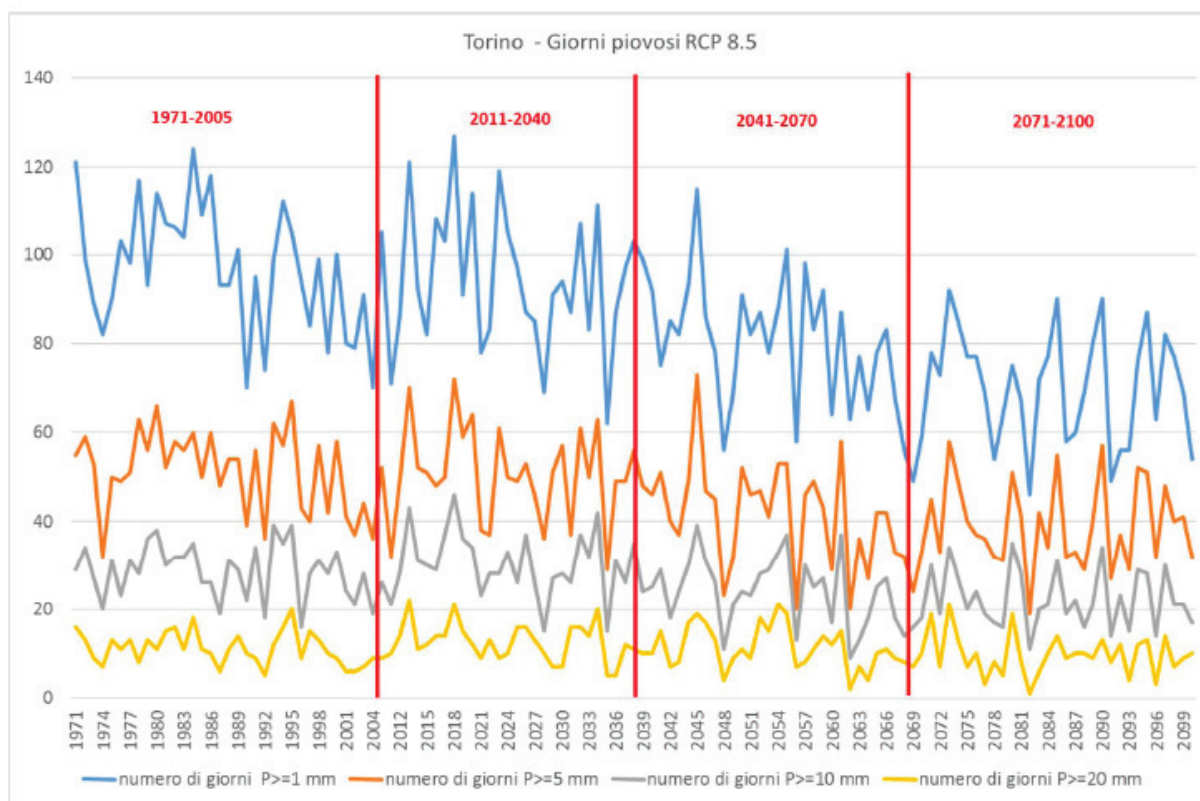


Figura 69 Numero di giorni con precipitazioni $\geq 1\text{mm}$, $\geq 5\text{mm}$, $\geq 10\text{ mm}$ e $\geq 20\text{ mm}$ secondo lo scenario RCP8.5.

Se si considera il numero di giorni piovosi si osserva una tendenza alla diminuzione rispetto al periodo 1971-2005 (Tabella 9) secondo lo scenario RCP8.5.

Tabella 9 Valori medi del numero di giorni piovosi dei periodi 1971-2005, 2011-2040, 2041-2070, 2071-2100 secondo lo scenario RCP8.5.

scenario RCP 8.5	n. giorni piovosi
1971-2005	97
2011-2040	94
2041-2070	78
2071-2100	71

Anche nello scenario RCP8.5, considerando il ciclo stagionale della pioggia, emerge che i mesi più piovosi risultano maggio e ottobre, meno piovosi i mesi estivi (giugno, luglio e agosto) soprattutto negli anni a partire dal 2011 (Figura 70).

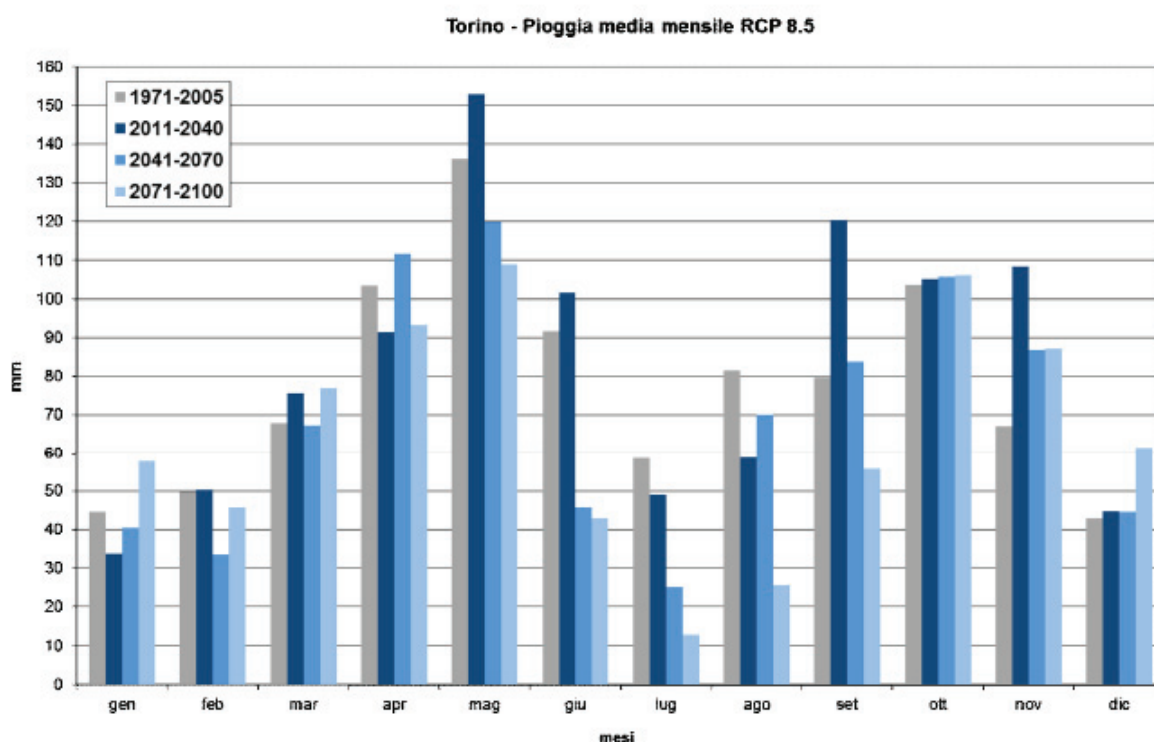


Figura 70 Pioggia media mensile dei periodi 1971-2005, 2011-2040, 2041-2070, 2071-2100 secondo lo scenario RCP4.5.

La pioggia annuale media nei periodi 2041-2070 e 2071-2100 è in diminuzione, risulta invece in aumento nel periodo 2011-2040 rispetto al periodo di controllo del modello.

Tabella 10 Precipitazione media annua dei periodi 1971-2005, 2011-2040, 2041-2070, 2071-2100 secondo lo scenario RCP8.5.

scenario RCP 8.5	precipitazione media (mm)
1971-2005	927
2011-2040	992
2041-2070	835
2071-2100	774

Nello scenario 8.5 si osserva una diminuzione delle precipitazioni di intensità moderata e forte e un aumento delle precipitazioni deboli ($P \leq 1$ mm) per tutti gli anni degli scenari futuri (Figura 71).

In particolare, si evince una generale diminuzione del numero di giorni piovosi più marcata per le precipitazioni di intensità debole e moderata, più stazionarie risultano le precipitazioni forti (Figura 72)

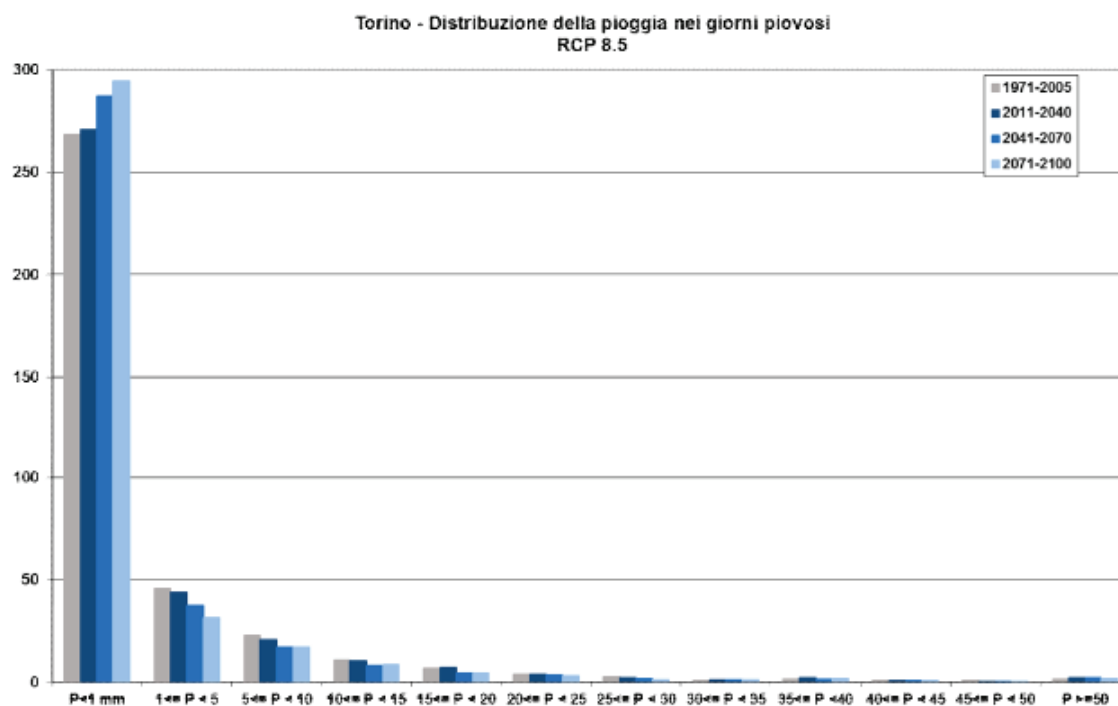


Figura 71 Distribuzione della pioggia nei giorni piovosi per i periodi 1971-2005, 2011-2040, 2041-2070, 2071- 2100 secondo lo scenario RCP8.5.

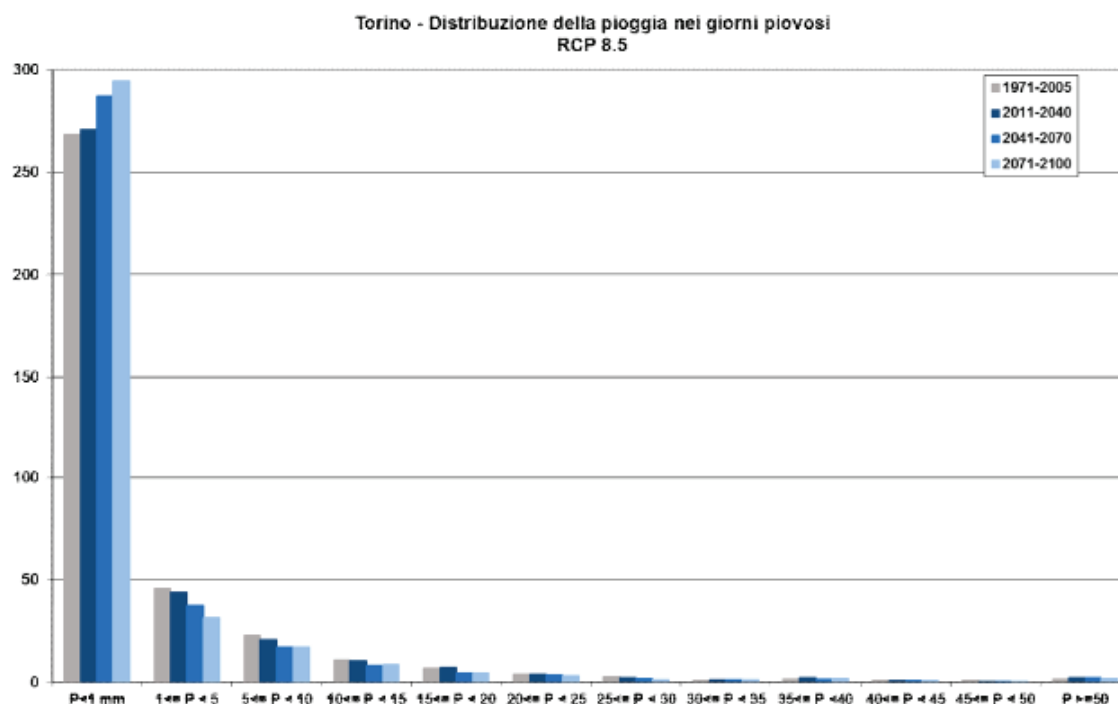


Figura 72 Distribuzione della pioggia nei giorni piovosi per i periodi 1971-2005, 2011-2040, 2041-2070, 2071- 2100 secondo lo scenario RCP8.5, utilizzando le soglie $P \geq 1\text{mm}$, $P \geq 5\text{mm}$, $P \geq 10\text{mm}$ e $P \geq 20\text{mm}$.

Utilizzando i dati dello scenario RCP 8.5 emerge una tendenza alla diminuzione delle precipitazioni più marcata negli scenari futuri (Figura 73).

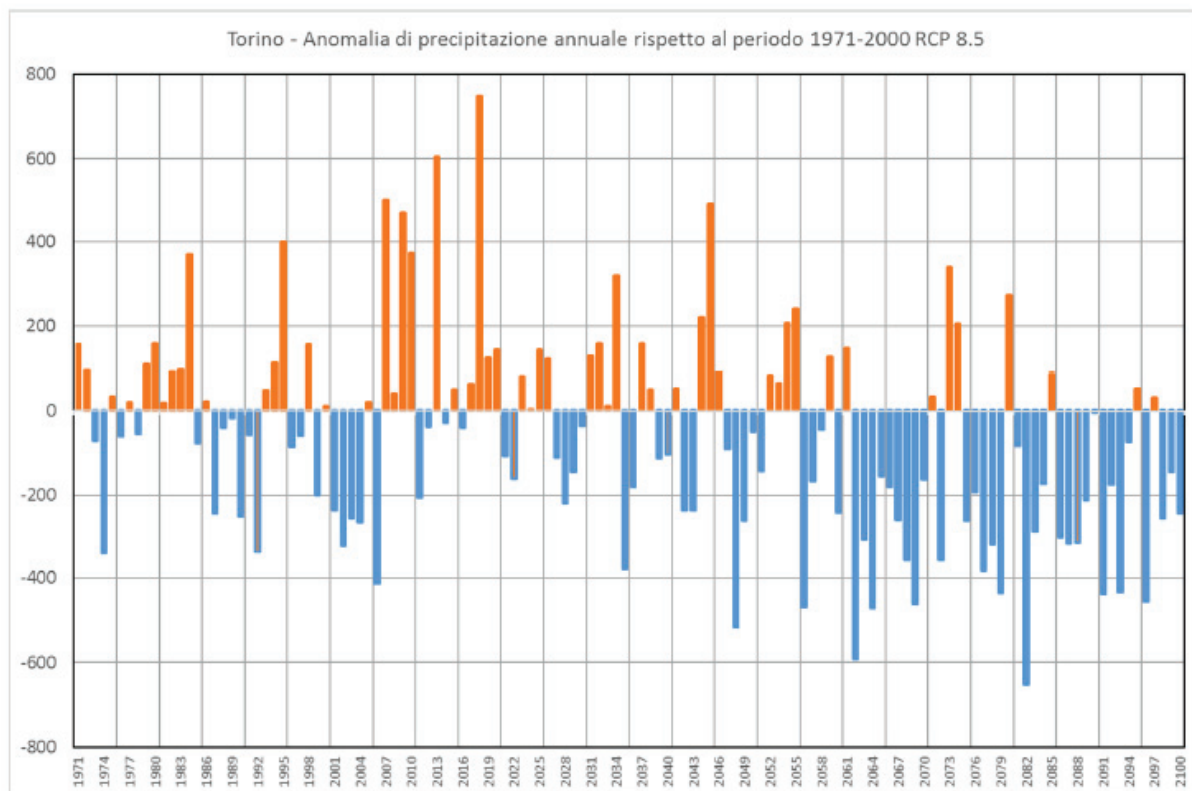


Figura 73 Anomalia di precipitazione annuale dal 1971 al 2100 rispetto al periodo 1971-2000 secondo lo scenario RCP8.5.

4.7 Siccità secondo lo scenario RCP4.5 e RCP8.5

Per lo scenario RCP 4.5 è stata analizzata la variazione della lunghezza massima annuale dei periodi secchi (giorni consecutivi con precipitazione inferiore ad 1 mm) per la città di Torino dal 1971 al 2005 (periodo di controllo del modello) e per gli anni 2011-2040, 2041-2070, 2071-2100 (Figura 74).

Anni	massima lunghezza dei periodi secchi RCP 4.5	Variazione massima lunghezza dei periodi secchi RCP 4.5
1971-2005	48	
2011-2040	60	+12
2041-2070	76	+28
2071-2100	93	+45

Si evidenzia una tendenza all'aumento della lunghezza massima annuale dei periodi secchi in tutti gli scenari futuri.

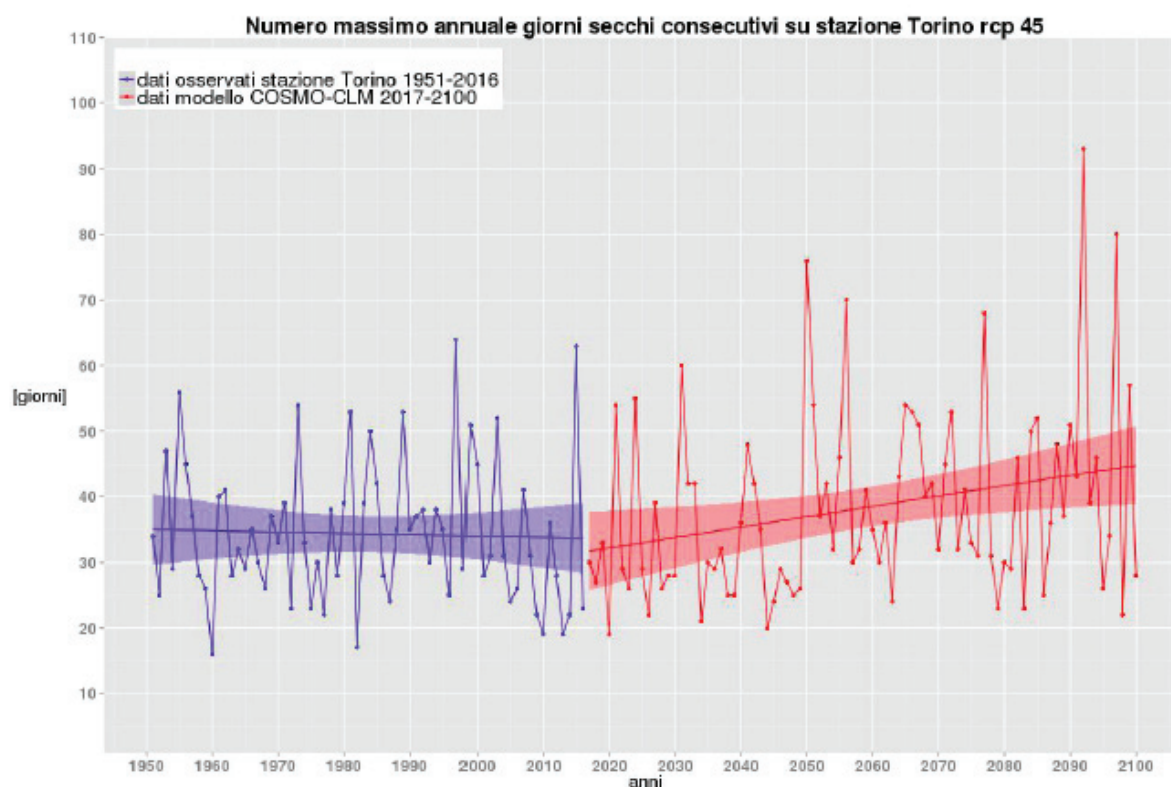


Figura 74 Lunghezza massima dei periodi secchi annuali (giorni consecutivi con precipitazione inferiore ad 1mm) dal 1971 al 2100 nello scenario RCP 4.5.

La stessa analisi è stata condotta per lo scenario RCP 8.5 (Figura 75) e anche in questo caso si evince una tendenza all'aumento del numero di giorni consecutivi di non pioggia, più marcato nel periodo 2071-2100.

Anni	massima lunghezza dei periodi secchi RCP 8.5	Variazione massima lunghezza dei periodi secchi RCP 8.5
1971-2005	40	
2011-2040	68	+12
2041-2070	75	+27
2071-2100	106	+58

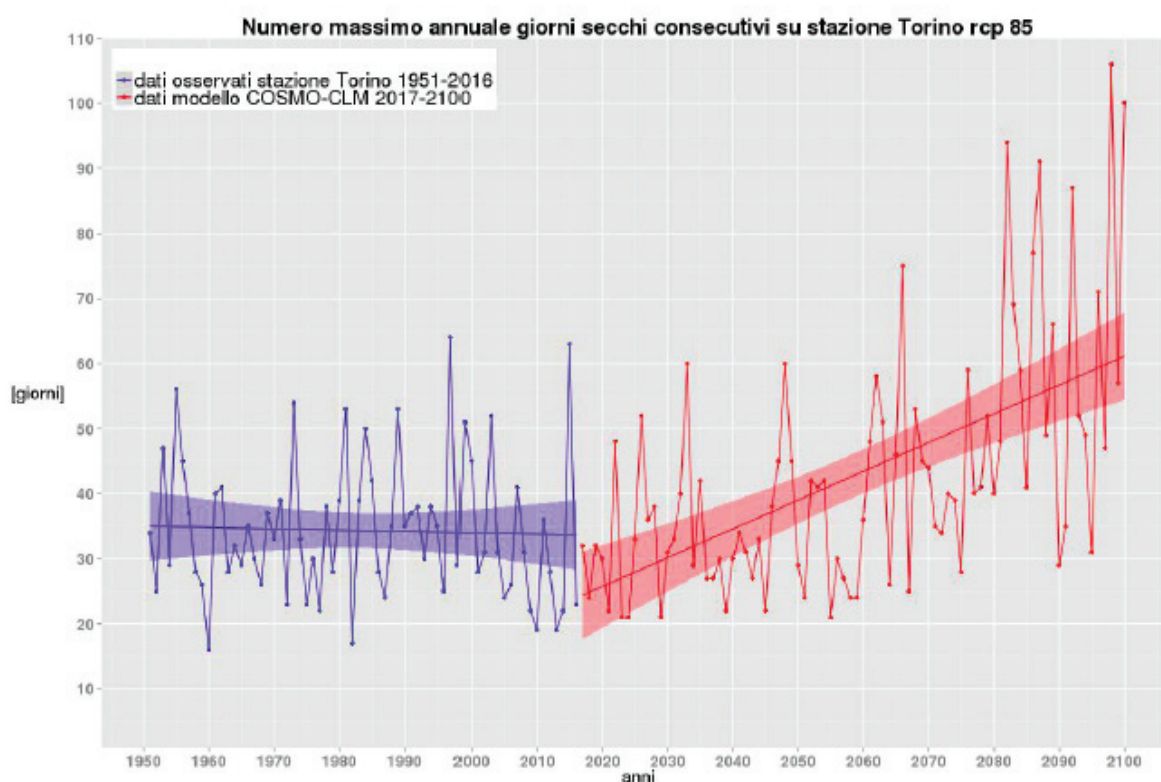


Figura 75 Lunghezza massima dei periodi secchi annuali (giorni consecutivi con precipitazione inferiore ad 1mm) dal 1971 al 2100 nello scenario RCP 8.5.

4.8 Ondate di caldo (effetti sulla mortalità, effetti sui consumi energetici)

Attraverso l'analisi delle relazioni individuate sui dati osservati, è stato possibile ottenere una stima della variazione degli impatti negli scenari futuri.

In particolare, per quanto riguarda la parte degli effetti sulla salute delle ondate di caldo e dei consumi energetici. Tali valutazioni non tengono però conto di altri fattori esterni di tipo non climatico che tenderanno a modificare nel corso del XXI secolo e potranno aggravare (ad esempio l'invecchiamento della popolazione) o a migliorare (ad esempio l'innovazione tecnologica) le stime sotto presentate.

Per quanto riguarda le ondate di calore, l'indice EHF, descritto al paragrafo 3.2.1, è stato applicato agli scenari futuri, ed è stato così possibile individuare i tre principali parametri: il numero di giorni estivi in ondata di caldo, il numero delle ondate di caldo e la massima lunghezza delle ondate di caldo.

Il numero di giorni caratterizzati da ondata di caldo, più rappresentativo degli effetti sulla salute, è rappresentato nella Figura 76. L'origine riferimento non è stata trovata. per lo scenario RCP 4.5 e nella Figura 77 per lo scenario RCP 8.5.

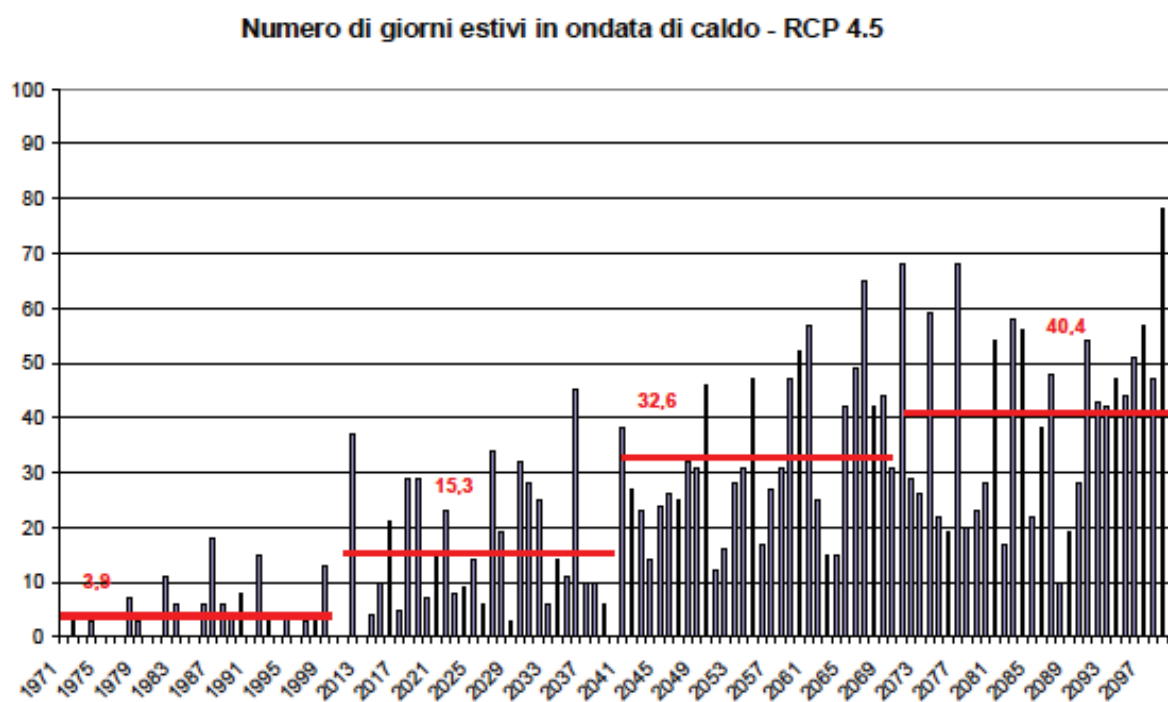


Figura 76 Numero di giorni estivi (giugno-settembre) caratterizzati da ondata di caldo nei trentenni 1971-2000, 2011-2040, 2041-2070 e 2071-2100 nello scenario emissivo 4.5.

Numero di giorni estivi in ondata di caldo - RCP 8.5

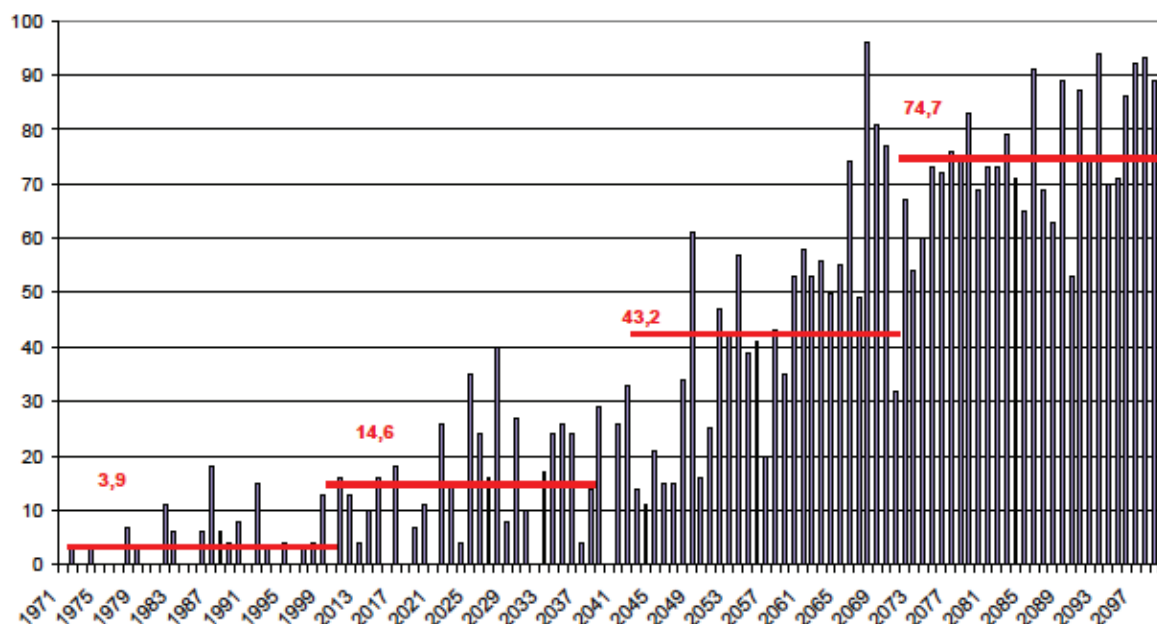


Figura 77 Numero di giorni estivi (giugno-settembre) caratterizzati da ondata di caldo nei trentenni 1971-2000, 2011-2040, 2041-2070 e 2071-2100 nello scenario emissivo 8.5

Come si evince dalle figure, per entrambi gli scenari emissivi il periodo intorno alla metà del secolo risulta molto critico, con un numero di giorni in ondata di caldo che tende a raddoppiare o triplicare rispetto al trentennio precedente. Per lo scenario peggiore, RCP8.5, l'aumento a fine secolo porta ad estati che avranno più della metà dei giorni in ondata di caldo.

Anche gli altri parametri (numero di ondate e massima lunghezza) aumentano, come si vede dai grafici in Figura 78 e Figura 79. In particolare, la massima durata aumenta in modo significativo, raggiungendo, e superando, anche un intero mese, a fine secolo.

Torino - scenario RCP 4.5 Ondate di calore

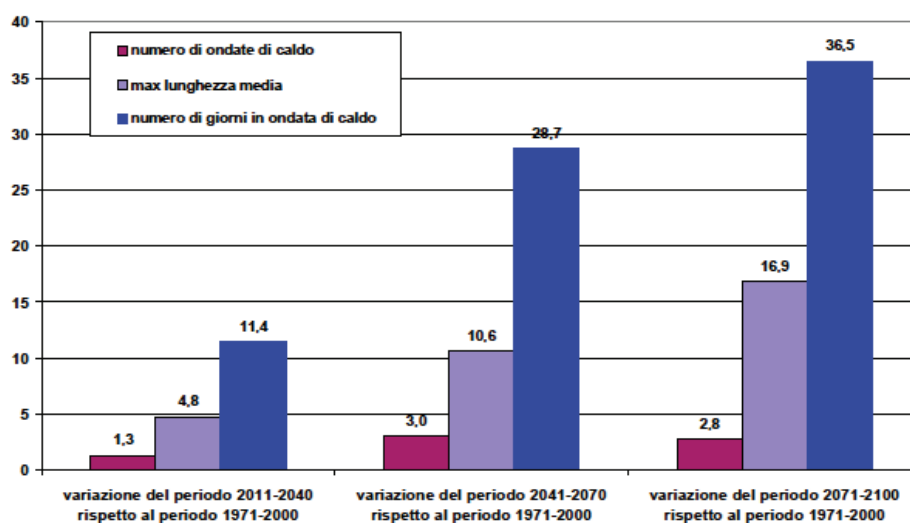


Figura 78 Variazione dei parametri (numero di ondate di caldo, massima lunghezza e numero di giorni in ondata di caldo) per i trentenni 2011-2040, 2041-2070 e 2071-2100 rispetto al periodo di riferimento 1971-2000 per lo scenario RCP 4.5.

Torino - scenario RCP 8.5 Ondate di calore

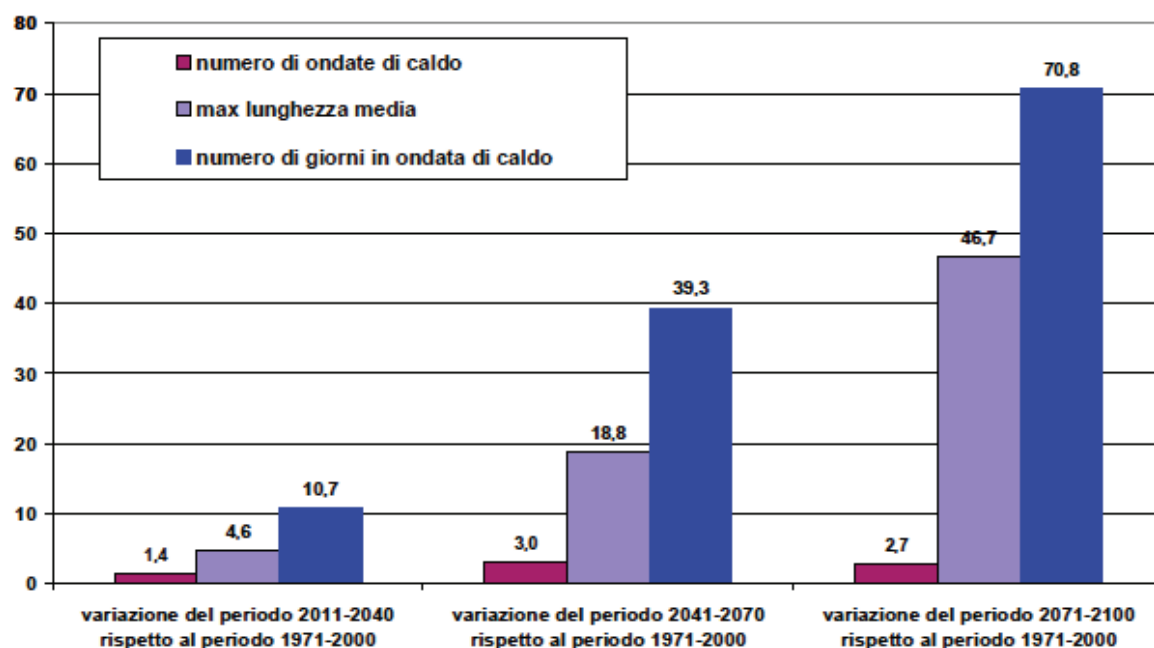


Figura 79 Variazione dei parametri (numero di ondate di caldo, massima lunghezza e numero di giorni in ondata di caldo) per i trentenni 2011-2040, 2041-2070 e 2071-2100 rispetto al periodo di riferimento 1971-2000 per lo scenario RCP 8.5.

Calcolando la media degli eccessi di mortalità futuri per ogni periodo trentennale dello scenario è possibile calcolare la variazione percentuale (Tabella 11): nel primo periodo si registrano 187 decessi cumulativi in eccesso (con una media di 15,3 giorni in ondata di calore), nel periodo 2041-2070 si registrano 406 decessi cumulativi in eccesso, ovvero il 117% in più rispetto al periodo 2011-2040 (con una media di 32,63 giorni in ondata). Invece nel periodo 2071-2100 si prevedono in media 505 decessi cumulativi in eccesso, il 170% in più rispetto al primo periodo (con 40,4 giorni in cui si verifica un'ondata di caldo).

Tabella 11 - Eccesso di mortalità stimata e scostamento percentuale rispetto al trentennio precedente per lo scenario emissivo RCP 4.5.

RCP 4.5	Eccesso di mortalità +65y	% di scostamento rispetto al trentennio precedente
2011-2040	187	
2041-2070	406	117%
2017-2100	505	170%

Per quanto riguarda gli eccessi di mortalità futura calcolati con lo scenario RCP 8.5 (Tabella 12), nel periodo 2011-2040 si stimano 184 decessi cumulativi in eccesso (con 14,6 giorni in cui si manifesta un'ondata di caldo), nel secondo periodo si prevedono 541 decessi cumulativi in eccesso (con 43,2 giorni in ondata), il 193% in più rispetto al primo periodo. Nell'ultimo intervallo di tempo 2071-2100 si prevedono addirittura 940 decessi cumulativi in eccesso (con 74,4 giorni in ondata), ovvero il 410% rispetto al primo periodo.

Tabella 12 - Eccesso di mortalità stimata e scostamento percentuale rispetto al trentennio precedente per lo scenario emissivo RCP 8.5.

RCP 8.5	Eccesso di mortalità +65y	% di scostamento rispetto al trentennio precedente
2011-2040	184	
2041-2070	541	193%
2017-2100	940	410%

Come anticipato precedentemente tali stime non tengono conto né della diversa distribuzione di età della popolazione, né di mutate condizioni socioeconomiche o delle azioni di adattamento intraprese, né delle possibilità di adattamento autonomo della popolazione e devono pertanto essere considerate di puro riferimento.

Per quanto riguarda i consumi energetici, e in particolare il picco di richiesta giornaliera, la correlazione evidente per i mesi di giugno e luglio, esclusi i giorni del fine settimana, con la temperatura, ha consentito di individuare una relazione lineare che consente di valutare l'andamento dei picchi di richiesta di energia negli scenari futuri, come descritto nel paragrafo 3.2.3..

La tabella sottostante mostra la percentuale del numero di giorni estivi caratterizzati da una richiesta di energia superiore ai 400MW per tre trentenni nel corso del XXI secolo nello scenario RCP 4.5, scenario di graduale mitigazione.

Tabella 13 Percentuali di giorni del periodo estivo caratterizzati da un picco di richiesta massima di energia di 400MW.

	%gg massimo carico > 400 MW		
	humidex	discomfort index	temperatura percepita
2011-2040	11%	14%	12%
2041-2070	24%	28%	25%
2017-2100	30%	34%	31%

Come si vede dalla tabella, sempre più giorni estivi saranno caratterizzati da una elevata domanda energetica e nel periodo 2041-2070 la numerosità raddoppierà rispetto al periodo 2011-2040. Anche nell'ultimo trentennio la percentuale aumenta ma in modo meno rapido, in coerenza con lo scenario di mitigazione dei gas serra RCP4.5.

5 Tabella di riepilogo per le temperature massime e minime

	1951 - 2019	2011-2040	2041-2070	2071-2100	Scenario	Significatività
Temperatura MASSIMA	+0,6°C/10 anni da 16.9°C del periodo 1951-1980 ai18.9°C del periodo 1981-2019 Maggiore aumento negli ultimi 30 anni +0,8°C/10 anni	+1,6°C	+2,8°C	+3,4°C	RCP 4.5	SI
		+0,3°C/10 anni				
		+2,5°C	+4,5°C	+6,9°C	RCP 8.5	SI
		+0,7°C/10 anni				
Temperatura MINIMA	-0,03°C/10 anni Stazionario nel tempo	+1,4°C	+2,6°C	+3,2°C	RCP 4.5	SI
		+0,3°C/10 anni				
		+1,1°C	+2,8°C	+5,1°C	RCP 8.5	SI
		+0,6°C/10 anni				

6 Tabella di riepilogo sulle precipitazioni

	1951-1983	1984-2019	p. controllo 1971-2000	2011-2040	2041-2070	2071-2100	Scenario	significatività
Precipitazione media	884 mm	896 mm	927 mm	-103 mm	-45 mm	-27 mm	RCP 4.5	NO
	Ha piovuto di più negli ultimi 30 anni			824 mm	882 mm	900 mm		
	Ma non c'è stata una NETTA tendenza all'aumento o alla diminuzione		927 mm	+65 mm	-92 mm	-153 mm	RCP 8.5	NO
				992 mm	835 mm	774 mm		
Giorni Piovosi	79 gg	75 gg	97 gg	-11 gg	-13 gg	-12 gg	RCP 4.5	NO
	Diminuiscono i giorni piovosi medi annui negli ultimi 30 anni			86 gg	84 gg	85 gg		NO
			97 gg	-3gg	-19 gg	-26 gg	RCP 8.5	NO
	94 gg	78 gg		71 gg	NO			
Giorni Secchi	34 gg (35gg nov-mar)		48 gg	+12 gg	+28 gg	+45 gg	RCP 4.5	NO
	1971-2000 → 36 gg (39 nov-mar)			60 gg	76 gg	93 gg		NO
	2001-2019 → 32 gg (33nov-mar)		48 gg	+12 gg	+27 gg	+106 gg	RCP 8.5	NO
	Lieve diminuzione dei giorni senza pioggia negli ultimi 15 anni			60 gg	75 gg	106 gg		NO

7 Tabella di riepilogo per le ondate di calore

La valutazione è fatta utilizzando un indice molto severo che evidenzia solo le ondate più intense.

	1951-1983	1984-2019	2011-2040	2041-2070	2071-2100	Scenario	significatività
N° ondate calore	1	1,4	+1,3	+3	+2,8	RCP 4.5	si
	Grande variabilità interannuale con eventi intensi nel 2003, 2006, 2015 e 2017		+1,4	+3	+2,7	RCP 8.5	si
Massima lunghezza ondate	3,9	4,2	+4,8 gg	+10,6 gg	+16,9 gg	RCP 4.5	si
	-		+4,6 gg	+18,8 gg	+46,7 gg	RCP 8.5	si
Var N° giorni in ondata di calore rispetto al controllo	-		+11,4 gg	+28,7 gg	+36,5 gg	RCP 4.5	si
	-		+10,7 gg	+39,3 gg	+70,8 gg	RCP 8.5	si
N° giorni estivi in ondata di calore	5,4	7,1	15,3 gg	32,6 gg	40,4 gg	RCP 4.5	si
	-	-	14,6 gg	43,2 gg	74,7 gg	RCP 8.5	si

8 Tabella di riepilogo per gli indici biometeorologici

	1989-2000	2001- 2019	2011-2040	2041-2070	2071-2100	Scenario	significatività
HUMIDEX > 30	67	89	+18gg	+33gg	+34gg	RCP 4.5	-
	Aumento del 33%		+23 gg	+33 gg	+40 gg	RCP 8.5	-
Discomfort Index >27	3,5	17,6	+6gg	+16gg	+18gg	RCP 4.5	-
	Più del quadruplo		+8gg	+23 gg	+37 gg	RCP 8.5	-
T° max apparente >32°C	22	47	+13gg	+29gg	+32gg	RCP 4.5	-
	Circa il doppio		+16gg	+37 gg	+50 gg	RCP 8.5	-
Giorni tropicali	32	52	+17 gg	+35 gg	+37 gg	RCP 4.5	-
	Aumento del 62%		+18 gg	+41 gg	+51 gg	RCP 8.5	-
Notti tropicali	18,7	17	+21 gg	+38 gg	+38 gg	RCP 4.5	-
	Nessuna variazione significativa		+25 gg	+39 gg	+47 gg	RCP 8.5	-

