



Allegato n. 2
del Piano Aria e Clima del Comune di Milano

Profilo Climatico Locale per la città di Milano

Direzione di Progetto Città Resilienti
Direzione Transizione Ambientale
Comune di Milano



**Comune di
Milano**



Profilo Climatico Locale per la città di Milano

Fase A: Studio della variabilità climatica osservata sul periodo 1961-2016/2017

Fase B: Studio dei cambiamenti climatici futuri sul periodo 2021-2050 rispetto al periodo 1971-2000, scenario emissivo RCP4.5

Il Profilo Climatico locale è stato elaborato nell'ambito dell'accordo di collaborazione sottoscritto in data 29.08.2018 tra Comune di Milano- Direzione di Progetto Città resilienti, ARPAE-Simc Emilia Romagna e ARPA Lombardia (rif. deliberazione di Giunta Comunale n. 1011/2018 del 8 giugno 2018 e determinazione dirigenziale n. 6/2018 del 24 luglio 2018 – P.G. n. 330568).

Responsabile del procedimento

Piero Pelizzaro *Direttore della Direzione di Progetto Città Resilienti
Comune di Milano*

A cura di

ARPAE - Simc Emilia Romagna

Dati e metadati climatici:

ARPA Lombardia

Elaborazioni relative allo studio dei cambiamenti climatici futuri sul periodo 2021-2050 rispetto al periodo 1971-2000:

Rodica Tomozeiu *Arpae-Simc Emilia Romagna*

Lucio Botarelli *Arpae-Simc Emilia Romagna*

Per lo scambio di opinioni e dati in riferimento allo studio della variabilità climatica osservata sul periodo 1961-2016/2017 si ringraziano:

Maurizio Maugeri *Università degli Studi di Milano*

Michele Brunetti *ISAC-CNR, Bologna*

Cristina Lavecchia *Fondazione Osservatorio Meteorologico Milano
Duomo*

INDICE

INTRODUZIONE..... 4

FASE A

1 | CLIMA E CAMBIAMENTO CLIMATICO - QUADRO GENERALE 6

2 | DATI E METODI PER LO STUDIO DELLA VARIABILITÀ CLIMATICA OSSERVATA A MILANO 8

2.1 | Data set osservativo 8

2.2 | Indicatori climatici 11

3 | ANALISI CLIMATICA DELLA TEMPERATURA MINIMA E MASSIMA A MILANO: VALORI MEDI ED ESTREMI 12

3.1 | Temperatura minima e massima: tendenze stagionali e annue 12

3.2 | Estremi di temperatura: variabilità stagionale e annua 15

3.3. | Onde di calore e notti tropicali 16

4 | ANALISI CLIMATICA DELLE PRECIPITAZIONI STAGIONALI E ANNUE A MILANO: VALORI MEDI ED ESTREMI 19

4.1 | Precipitazione cumulata: tendenze e cambiamenti 19

4.2 | Estremi di precipitazione: frequenza degli eventi estremi e giorni secchi 21

5 | CONCLUSIONI SULLA VARIABILITÀ CLIMATICA OSSERVATA 23

5.1 | Temperatura 23

5.2 | Precipitazione 23

FASE B

6 | PROIEZIONI CLIMATICHE FUTURE - QUADRO GENERALE..... 25

7 | MODELLO DI REGIONALIZZAZIONE STATISTICA (SDs) 28

8 | PROIEZIONI FUTURE DELLA TEMPERATURA MINIMA E MASSIMA: VALORI MEDI ED ESTREMI 30

8.1 | Temperatura minima e massima stagionale 30

8.2 | Estremi di temperatura 32

9 | PROIEZIONI FUTURE DELLE PRECIPITAZIONI STAGIONALI: VALORI MEDI ED ESTREMI 34

9.1 | Precipitazione cumulata 34

9.2 | Giorni secchi 34

10 | CONCLUSIONI SUGLI SCENARI CLIMATICI FUTURI 36

11 | BIBLIOGRAFIA 37

11.1 | Fase A 37

11.2 | Fase B 38

INTRODUZIONE

Osservato

Il Profilo Climatico Locale rappresenta uno strumento per l'analisi della variabilità climatica su varie scale di tempo: passato, presente e futuro.

Il presente documento descrive nella sua prima parte i risultati della variabilità climatica osservata sulla città metropolitana di Milano, prendendo in considerazione le principali grandezze meteo-climatiche: temperatura e precipitazioni, misurate in vari punti della città e su vari orizzonti temporali.

L'analisi climatica è focalizzata sulle tendenze e punti di cambiamento sia nei valori medi che nei valori estremi. Per questa ragione è necessario prendere in considerazione serie temporali con registrazioni di almeno 30 anni (secondo la *Normals Guide to Climate 1901 16* della WMO) in modo tale che i risultati possono essere caratterizzati anche da punto di vista della significatività statistica.

Futuro

La seconda parte del presente documento descrive i risultati della variabilità climatica futura sull'area di Milano, prendendo in considerazione le principali grandezze climatiche: temperatura e precipitazioni (campi medi ed estremi). Le proiezioni sono state costruite attraverso la tecnica di regionalizzazione statistica (SDs) applicata al modello globale CMCC-CM, scenario emissivo RCP4.5, secondo quanto previsto dall'accordo di collaborazione.

L'orizzonte temporale è il periodo 2021-2050, mentre i cambiamenti sono valutati rispetto al clima di riferimento 1971-2000. Inoltre, sono descritti anche i risultati di alcune simulazioni per lo stesso scenario emissivo RCP4.5, ottenute attraverso l'applicazione del modello CCAReg ai modelli globali CNRM e MPI e all'insieme dei tre GCM, per ridurre l'incertezza modellistica nelle proiezioni del clima futuro.

Fase A

Studio della variabilità climatica osservata sul periodo 1961-2016/2017

1 | CLIMA E CAMBIAMENTO CLIMATICO - QUADRO GENERALE

I cambiamenti climatici sono evidenti dalla scala globale a quella locale. L'intensità e la significatività del cambiamento climatico varia da regione a regione, essendo talvolta il segnale di cambiamento più intenso ad una scala più piccola. Una conoscenza a scala locale è necessaria per determinare i principali rischi, soprattutto quando si definiscono i piani di adattamento a livello di città.

A scala globale, l'ultimo rapporto dell'IPCC (WG1-AR5, 2013) sottolinea un trend di crescita della temperatura media osservata compreso tra 0.65°C e 1.06°C nel periodo 1880-2012 e significative variabilità decennali e interannuali. Per quanto riguarda le precipitazioni, il segnale è più variegato: dal 1951 ad oggi si sono osservati incrementi nell'Europa del Nord e diminuzioni nel Mediterraneo.

Un quadro climatico completo implica l'analisi della variabilità temporale e spaziale sia dei valori medi che degli estremi. Gli eventi estremi sono indicati come eventi che differiscono sostanzialmente dalla media climatologica e sono definiti attraverso le soglie (ad esempio percentili, minimi, massimi). Nel presente lavoro le soglie dei percentili sono 10, 90 e 97.5. Negli ultimi anni la frequenza degli eventi estremi sembra essere aumentata, con conseguenze spesso importanti, a volte anche drammatiche per la società e gli ecosistemi naturali. Ad esempio, in Europa nell'ultimo secolo la frequenza delle onde di calore e degli eventi estremi relativi a temperature elevate è aumentata, mentre è diminuita la frequenza eventi estremi relativi alle basse temperature. Per quanto riguarda le precipitazioni, numerosi studi hanno mostrato come a livello europeo negli ultimi anni la frequenza di fenomeni intensi, anche siccitosi, sia aumentata.

I segnali di cambiamento climatico sono visibili non solo a scala globale oppure europea, ma anche a scale più piccole, come la Penisola Italiana. Il segnale più uniforme riguarda la temperatura, dove è stato notato un generale aumento della temperatura media. Brunetti et al. (2006) analizzando le serie storiche di temperature annue sull'Italia ha evidenziato una tendenza positiva nel lungo periodo 1880-2011 ($0.1^{\circ}\text{C}/\text{decennio}$). Questo segnale diventa più intenso soprattutto negli ultimi decenni 1981-2005 ($0.5^{\circ}\text{C}/\text{decennio}$). A livello stagionale, Toreti e Desiato (2010) evidenziano un trend positivo della temperatura media in tutte le stagioni, con un aumento maggiore durante la stagione estiva. L'anno più caldo è stato il 2003, con un'anomalia media stimata di $+1.57^{\circ}\text{C}$, ma non è da trascurare il 2015 con 1.43°C oppure il 2017 con un'anomalia di $+1.3^{\circ}\text{C}$, tutti valori sopra alla media del periodo 1971-2000 (stima ISAC-CNR). Gli estremi di temperatura sulla penisola Italiana hanno mostrato nelle ultime decadi un aumento del numero di eventi sopra-soglia e una diminuzione del numero di eventi sotto-soglia, più pronunciato per le temperature massime che per le minime (SNACC,2014).

Le precipitazioni hanno una variabilità spaziale molto più marcata. Brunetti et al. (2006), analizzando la variabilità temporale della quantità annua di precipitazioni sull'Italia, hanno evidenziato una leggera tendenza negativa sul periodo 1800-2011 ($-0.58\pm 0.15\%/\text{decennio}$), più intensa nel nord Italia ($-0.71\pm 0.19\%/\text{decennio}$) che nel Sud-Italia. Pavan et al., (2018) analizzando le tendenze nelle precipitazioni sul centro- nord Italia, su un data set con una risoluzione di $5\times 5\text{km}$ per il periodo 1961-2015 (<https://www.arcis.it/wp/>), hanno evidenziato tendenze negative significative nelle cumulate annuali solo nell'Italia centrale e nella parte interna delle pianure settentrionali, mentre tendenze positive, significative, sono presenti in diverse aree delle Alpi e della costa Ligure. Le stagioni più colpite dai cambiamenti delle precipitazioni sono l'estate e l'autunno. Oltre la parte meridionale della pianura Padana e dell'Italia centrale, le precipitazioni estive stanno diventando significativamente meno frequenti. In autunno, le precipitazioni totali sono invece caratterizzate da significative tendenze positive su vaste aree del nord Italia e da significative tendenze negative nelle aree interne dell'Appennino centrale (Pavan et al., 2018).

Il 2017 è stato l'anno più secco in Italia dal 1800 ad oggi. Secondo ISAC-CNR le piogge sono state oltre il 30% inferiori alla media del periodo di riferimento 1971-2000.

Un segnale importante è stato evidenziato anche negli estremi di precipitazione sulla penisola italiana: il numero di giorni piovosi presenta un chiaro trend negativo su tutto il territorio italiano, mentre l'intensità delle precipitazioni presenta un trend generalmente positivo, con valori e livelli di significatività variabili a seconda della regione (Toreti e Desiato, 2010). Nel lungo periodo si rileva anche una diminuzione significativa del numero di eventi di bassa intensità.

L'analisi di tendenza, intensità e frequenza delle precipitazioni dipende molto dalla finestra temporale e dalle zone analizzate.

2 | DATI E METODI PER LO STUDIO DELLA VARIABILITÀ CLIMATICA OSSERVATA A MILANO

Il rapporto di sintesi della Strategia Regionale di Adattamento ai Cambiamenti Climatici per la regione Lombardia sottolinea che dal 1850 ad oggi, la temperatura media dell'aria per la regione è aumentata in circa 2°C, corrispondendo a un incremento delle temperature medie di circa (+) 0.12 °C per decade. Per quanto riguarda invece l'andamento a lungo termine delle precipitazioni cumulate, dal 1850 ad oggi, a livello della regione si è registrato un leggero calo nella quantità totale annua (dell'ordine del - 5% ogni cento anni), più intenso durante gli ultimi decenni¹.

La regione, così come sottolinea la strategia, a causa delle caratteristiche orografiche, territoriali e socio-economiche presenta una elevata vulnerabilità e variabilità; pertanto la definizione dei piani di adattamento a livello di città richiede elaborazioni climatiche specifiche, essendo necessario uno studio focalizzato a scala locale.

Per questa ragione, il presente studio espone solo i risultati dell'analisi climatica sulla città metropolitana di Milano per il periodo 1951-2017 e con un focus sul periodo più recente 1961-2017.

2.1 | Data set osservativo

Il Profilo Climatico Osservato per la città metropolitana di Milano è stato costruito partendo dai dati giornalieri di temperatura minima, massima e quantità di precipitazione, dati messi a disposizione da ARPA Lombardia. Lo studio della variabilità climatica necessita l'utilizzo di serie storiche. La Tabella 1 presenta la lista delle stazioni meteo-climatiche selezionate per questo studio, che dispongono di serie storiche con almeno di 80% dei dati. Come si può notare dalla Tabella 1, sono 4 le stazioni che hanno superato il criterio dei dati presenti nella serie, serie che però iniziano e finiscono in momenti diversi; quindi il primo passo è stato quello di completare e aggiornare le serie di dati con altri disponibili sul data set nazionale SCIA2.

La serie climatica della stazione di Brera, è una seria storica centenaria con misure climatiche dal 1753; la stazione lungo il percorso ha registrato anche degli spostamenti. Gli spostamenti, le modifiche dell'ambiente circostante (palazzi, alberi), la sua collocazione (in mezzo a un giardino o vicino a una strada trafficata), sono alcuni

¹ http://www.regione.lombardia.it/wps/wcm/connect/841f23be-02ea-423c-b868-052cc92b6578/Allegato+alla+Comunicazione_Rapporto+di+sintesi_DEF.pdf?MOD=AJPE RES&CACHEID=841f23be-02ea-423c-b868-052cc92b6578

² http://www.scia.isprambiente.it/wwwrootscia/Home_new.html#

elementi che determinano delle disomogeneità nei dati, influenzando il segnale climatico registrato. La qualità dei dati della stazione di Brera è stata descritta e analizzata in dettaglio da Maugeri et al., (2002a e 2002b). La Figura 1 mostra in dettaglio i metadati (problematiche) della stazione di Brera così come sono presentati dal lavoro di Maugeri et al. (2002a e 2002b).

Le stazioni di **Milano Zavattari** e **Milano Juvara**, anche se hanno periodi più breve di registrazione che iniziano rispettivamente nel 1989 e nel 2002, sono state prese in considerazione per incrementare il numero di stazioni sull'area di studio. Per queste due stazioni solo gli indicatori che non necessitano del periodo climatico di riferimento (1971-2000) sono stati calcolati e analizzati. Inoltre, queste stazioni, insieme con la stazione di Brera, costituiscono le cosiddette stazioni "urbane", mentre Milano Linate è una stazione assimilabile a rurale.

I dati giornalieri della stazione di **Milano Linate** iniziano nel 1951. Fino al 2000 sono stati utilizzati i dati di fonte ARPA Lombardia; dal 2001 al 2017 i dati provengono dal data set nazionale SCIA³.

*Riassumendo, l'analisi climatica di questo studio ha come base le stazioni di **Brera** e **Milano Linate**, sul periodo comune 1951-2015/2017, con il contributo delle stazioni **Milano Juvara** e **Milano Zavattari** per i periodi più corti.*

Stazione	Precip. (SI/NO)	Data inizio	Data fine	Temp. (SI/NO)	Data inizio	Data fine
Milano Brera	Si	01/01/1901	31/12/2015	Si	01/01/1901	31/12/2017
Milano Juvara	Si	01/01/1989	18/04/2018	Si	01/01/1989	18/04/2018
Milano Zavattari	Si	01/01/2005	18/04/2018	Si	01/01/1989	18/04/2018
Milano Linate	Si	01/01/1951	31/11/2017	Si	01/01/1951	31/10/2017

Tabella 1. Stazioni utilizzate nell'analisi climatica per la città di Milano

³ http://www.scia.isprambiente.it/wwwrootscia/Home_new.html#

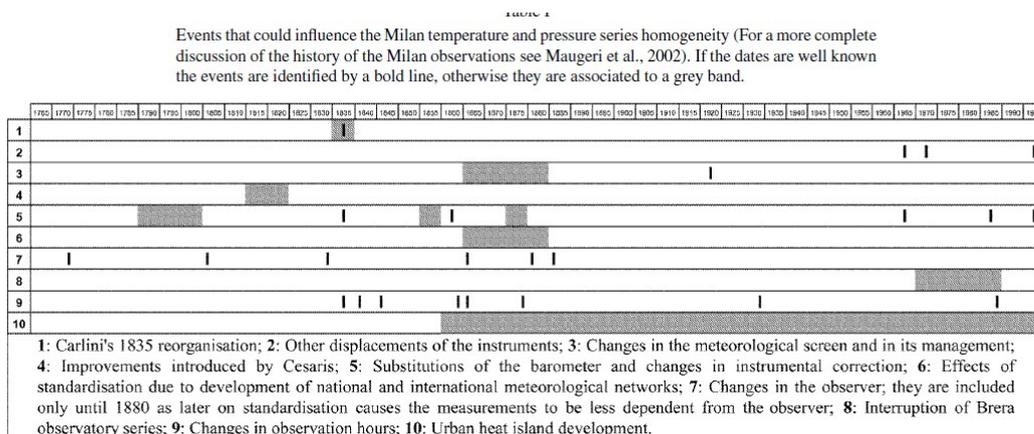
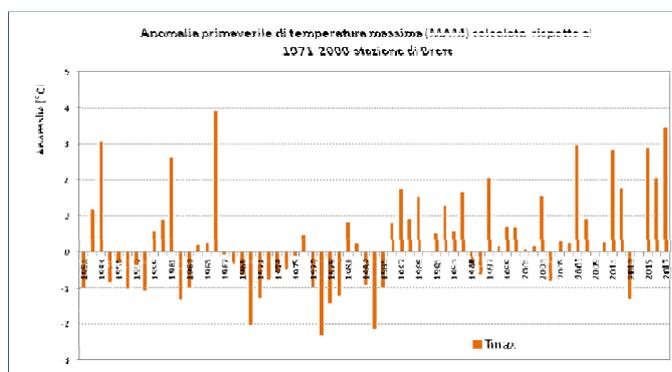


Figura 1. Metadati stazione di Brera (Maugeri et al., 2002)

Tutti le serie storiche di dati giornalieri, del periodo dal 1951 ad oggi, sono state sottoposte ad una breve analisi di qualità per evidenziare eventuali problemi. L'analisi ha rilevato valori "fuori scala", oppure periodi lunghi con lo stesso valore. Un esempio di analisi viene riportato nella Figura 2, per la stazione di Brera (a) e per la stazione di Milano Linate (b). La Figura 2a presenta l'andamento delle anomalie primaverili della temperatura massima, per il periodo 1951-2017: come si può notare, anomalie particolarmente intense vengono riportate per il 1954, 1966, valori non in linea con Milano Linate. L'analisi ha rilevato valori molto alti per alcuni giorni, ad esempio 29°C il 18/04/1966, oppure 31°C il 16/05/1966. Il periodo dal 1965-1970 coincide con degli spostamenti della stazione (vedi Figura 1), che hanno influenzato le registrazioni. La Figura 2b mostra invece un caso di valori uguali rilevati per un lungo periodo di tempo nella stazione di Milano Linate.



a) Andamento delle anomalie primaverili di temperatura massima- Brera



b) Andamento Tmax Milano Linate

Figura 2. Andamenti temporali per Brera e Milano Linate

I valori sia delle temperature sia delle precipitazioni che risultano "sospetti" sono stati sostituiti con il codice attribuito al dato mancante" e le serie risultate sono state utilizzate per lo studio della variabilità climatica.

L'analisi della variabilità climatica consiste nel calcolo delle anomalie rispetto al 1971- 2000, nella valutazione del trend per ogni indicatore e stagione. La tendenza è stata stimata usando il metodo dei minimi quadrati e la sua significatività è stata verificata mediante il test non-parametrico di Kendall-Tau. La presenza di serie lunghe di dati permette, soprattutto nel caso delle precipitazioni, di identificare delle decadi o delle annate particolari (es. siccitose), anche se sul lungo periodo il trend non è significativo.

2.2 | Indicatori climatici

Partendo dai dati giornalieri sono stati calcolati i seguenti indicatori stagionali e annuali selezionati nell'ambito del lavoro, per descrivere la variabilità climatica locale:

- temperatura minima (Tmin) e massima (Tmax) stagionale e annua;
- il 90^{mo} percentile della temperatura massima (Txq90);
- il 10^{mo} percentile della temperatura minima (Tnq10);
- il numero di giorni con gelo, definito come il numero di giorni in cui la temperatura minima è inferiore a 0°C (Fd)
- il numero di giorni con ghiaccio, definito come numero di giorni in cui la temperatura minima e massima è inferiore a 0°C (Txice)
- la durata delle onde di calore (HWD), definita come il numero massimo consecutivo di giorni in cui la temperatura massima supera il 90^{mo} percentile, calcolato dai dati giornalieri nel periodo climatico 1971-2000
- le notti tropicali, definite come i numeri di giorni con la temperatura minima maggiore di 20°C;
- la quantità di precipitazione stagionale e annua (prec);
- il numero di giorni in cui la pioggia eccede il 90^{mo} percentile (pxq90N) normalizzato rispetto al numero di giorni con dati validi;
- il numero massimo di giorni consecutivi senza pioggia (pxcdd);

Gli indicatori, calcolati su base stagionale e annuale, descrivono sia l'intensità che la frequenza degli eventi estremi di precipitazioni e di temperatura e contribuiscono alla definizione del profilo climatico osservato. Sono state analizzate tendenze, intensità e frequenze.

3 | ANALISI CLIMATICA DELLA TEMPERATURA MINIMA E MASSIMA A MILANO: VALORI MEDI ED ESTREMI

3.1 | Temperatura minima e massima: tendenze stagionali e annue

Lo studio dell'andamento temporale della temperatura minima e massima annua mostra, per il periodo 1951-2017, una tendenza all'aumento, significativa dal punto di vista statistico (test Kendall), con un valore di circa $0.3^{\circ}\text{C}/10$ anni per Brera e $0.4^{\circ}\text{C}/10$ anni per Milano Linate. La tendenza è leggermente più alta se viene preso in considerazione il periodo 1961-2017, circa $0.4^{\circ}\text{C}/10$ anni per Brera e $0.5^{\circ}\text{C}/10$ anni per Linate, il coefficiente di tendenza essendo dipendente dal periodo e la lunghezza della serie dei dati (Tomozeiu et al., 2000)

La figura 3 mostra, come esempio, l'andamento temporale delle anomalie annue di temperatura minima e massima misurate a Brera durante il periodo 1951-2017, anomalie calcolate rispetto al periodo 1971-2000.

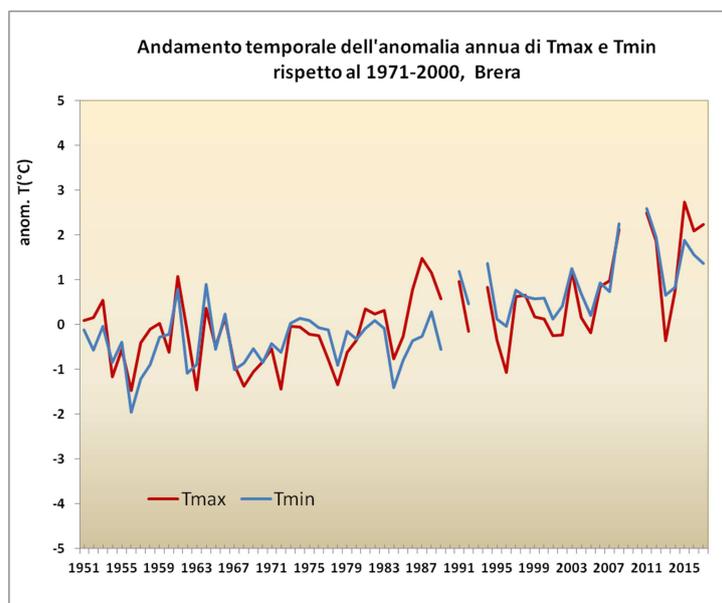


Figura 3. Andamento temporale dell'anomalia annua di temperatura massima (rosso) e minima (blu) a Brera

Analizzando la Figura 3, la tendenza all'aumento delle temperature (minima e massima) diventa più marcata dopo gli anni '90, quando sono stati registrati picchi di anomalia annua fino a 3°C . Questi picchi di anomalia, però, potrebbero anche cambiare la loro posizione nella serie, visto la presenza dei dati mancanti, specialmente per gli anni tra il 2009 e 2010, che non hanno permesso il calcolo delle anomalie. Inoltre, è importante sottolineare che, se prima degli anni '90 le anomalie negative erano più frequenti, sia per le minime che per le massime, dopo il 1990 le anomalie negative diventano meno frequenti e con una intensità minore. Un segnale simile nelle temperature annue, leggermente più intenso, è stato trovato anche per Milano Linate (figure non riportate).

A livello stagionale, le tendenze sul periodo 1951-2017 sono in aumento, sia per le temperature minime che per le temperature massime. Come nel caso delle temperature annue, nel periodo più corto 1961-2017, il coefficiente di tendenza stagionale diventa leggermente più intenso, sia per Brera che per Milano Linate. La Tabella 2 indica il coefficiente di tendenza delle temperature minime e massime stagionali, nel periodo 1961-2017 per le stazioni di Brera (a) e Milano Linate (b).

a) **Brera**

	Inverno (°C/10anni)	Prim. (°C/10anni)	Estate (°C/10anni)	Autunno (°C/10anni)	Annuo (°C/10anni)
Tmax	0.5	0.4	0.4	0.3	0.4
Tmin	0.4	0.4	0.5	0.3	0.4

b) **Milano Linate**

	Inverno (°C/10anni)	Prim. m. (°C/10anni)	Estate (°C/10anni)	Autunno (°C/10anni)	Annuo (°C/10anni)
Tmax	0.6	0.5	0.6	0.4	0.5
Tmin	0.4	0.5	0.6	0.5	0.5

Tabella 2. Coefficiente di tendenza della temperatura massima (Tmax) e minima (Tmin) per le stazioni di Brera (a) e Milano Linate (b), periodo 1961-2017. Le tendenze significative al 95% sono evidenziate in grassetto

L'analisi rileva un segnale molto importante per tutte le stagioni (Tabella 2) sia per le temperature minime che massime. La tendenza all'aumento è significativa e compresa tra 0.3°C/10 anni durante l'autunno (vedi Brera), e 0.6°C/10 anni, per la massima e minima estiva e massima invernale (vedi Milano Linate). Il segnale è significativo dal punto di vista statistico per entrambe le stazioni. Andando ad analizzare la distribuzione delle anomalie stagionali, è stato notato che il segnale di aumento avviene dopo il 1990, quando, come nel caso dei valori annui, pochi sono gli anni con le anomalie negative. La Figura 4 presenta, come esempio, la distribuzione delle anomalie stagionali di temperatura minima e massima per la stazione di Brera.

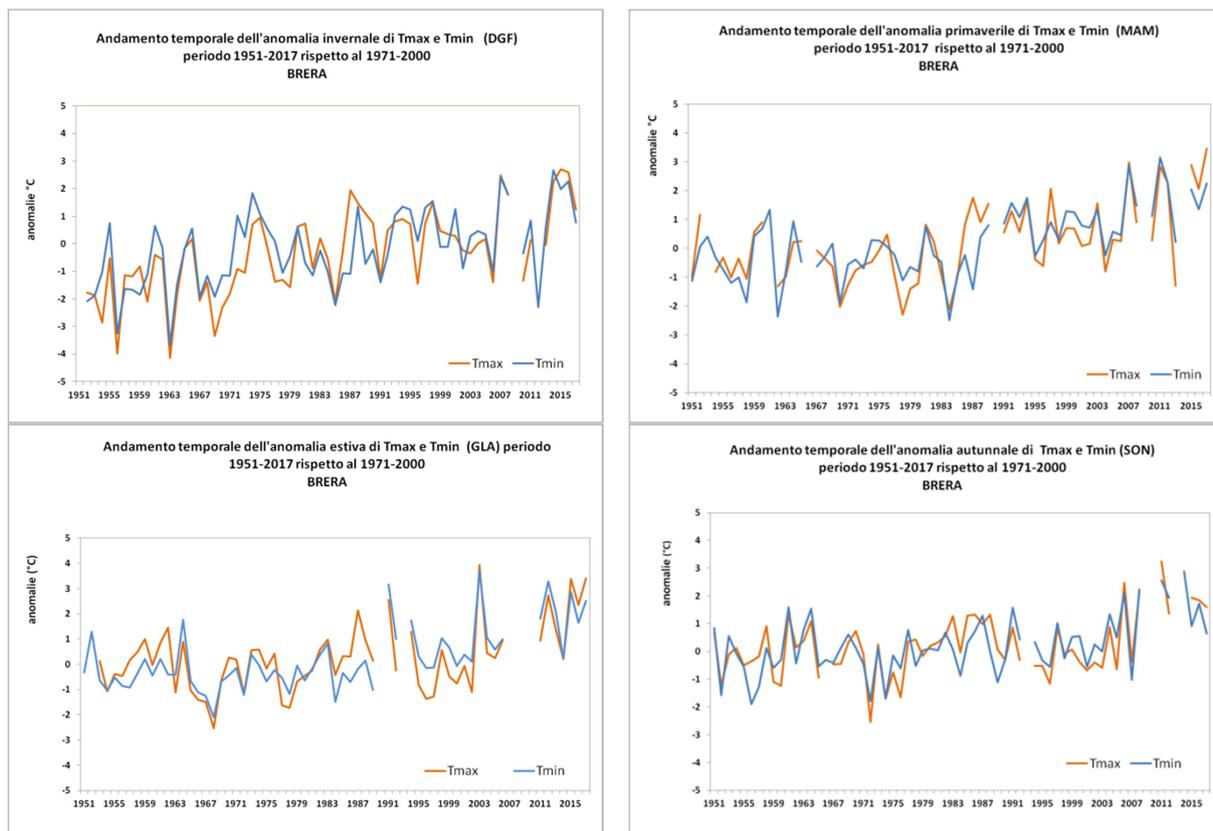


Figura 4. Andamento temporale delle anomalie di Tmin e Tmax stagionale- Brera, 1951-2017

L'aumento di temperatura, soprattutto dopo il 1990 (vedi Figura 4) ha portato ad anomalie di temperatura anche di 3-4°C, sia nei valori minimi che massimi. L'estate è la stagione con le anomalie più intense, seguita da primavera e autunno. Un segnale simile è stato trovato anche per Milano Linate, con valori di anomalia anche più intensi. La Figura 5 riporta le anomalie termiche registrate durante l'estate. Si noti il 2003, l'anno più caldo della serie 1951-2017. Anomalie molto intense si possono notare anche durante il 2017, 2015, 2012 (attorno a 3°C rispetto al periodo 1971-2000).

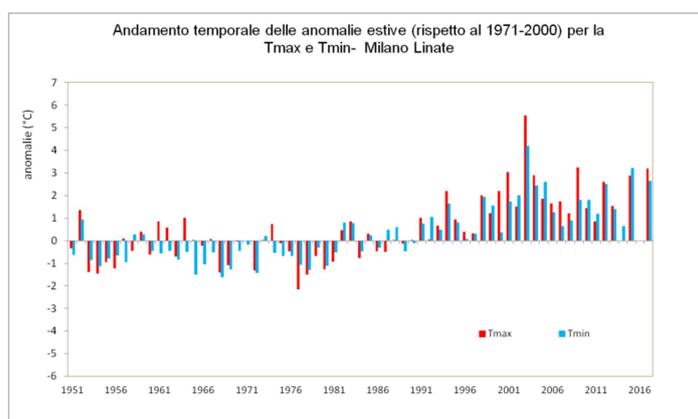


Figura 5 Andamento temporale delle anomalie di Tmin e Tmax estate- Milano Linate, 1951-2017

3.2 | Estremi di temperatura: variabilità stagionale e annua

Il riscaldamento registrato nei valori medi stagionali si ritrova anche negli estremi di temperatura, portando a un aumento del 10^{mo} e 90^{mo} percentile della temperatura minima (Tnq10 e Tnq90) in tutte le stagioni e a un aumento del 90^{mo} e 97.5^{mo} percentile della temperatura massima (Txq90, Txq97.5). La Tabella 3 mostra i coefficienti di tendenza (in °C/10 anni) a livello stagionale di queste soglie: bassa (10^{mo}), alta (90^{mo}) e molto alta (97.5^{mo}); le tendenze sono calcolate sul periodo 1961-2017.

	Inverno	Primavera	Estate	Autunno	Annua
Txq90	0.5	0.3	0.3	0.3	0.4
Txq97.5	0.5	0.5	0.4	0.4	0.3
Tnq10	0.6	0.4	0.5	0.4	0.4
Tnq90	0.3	0.4	0.4	0.2	0.5

a)

Brera

	Inverno	Primavera	Estate	Autunno	Annua
Txq90	0.5	0.4	0.5	0.2	0.5
Txq97.5	0.4	0.5	0.5	0.3	0.5
Tnq10	0.4	0.3	0.4	0.3	0.3
Tnq90	0.3	0.4	0.5	0.3	0.5

b) Milano Linate

Tabella 3. Trend stagionali e annui (°C/10anni) dei percentili degli eventi estremi di temperatura sul periodo 1961-2017, Brera (a) e Milano Linate(b). Le tendenze significative al 95% sono evidenziate in grassetto

Come si può notare dalla Tabella 3 una tendenza positiva, compresa in genere tra 0.2°C/decade e 0.6°C/decade si riscontra in tutte le stagioni e per tutte le soglie (alte o basse). Inoltre, per la stazione "urbana" di Brera, un incremento leggermente più intenso di Linate si nota durante l'inverno ed autunno. La Figura 6 mostra, come esempio, l'andamento temporale delle due soglie per la stazione di Milano Linate nel periodo 1951-2017. Il valore più alto corrisponde a quello registrato nel 2003, quando la soglia del 90^{mo} percentile ha toccato circa 36°C mentre quella del 97.5^{mo} ha raggiunto circa 38°C.

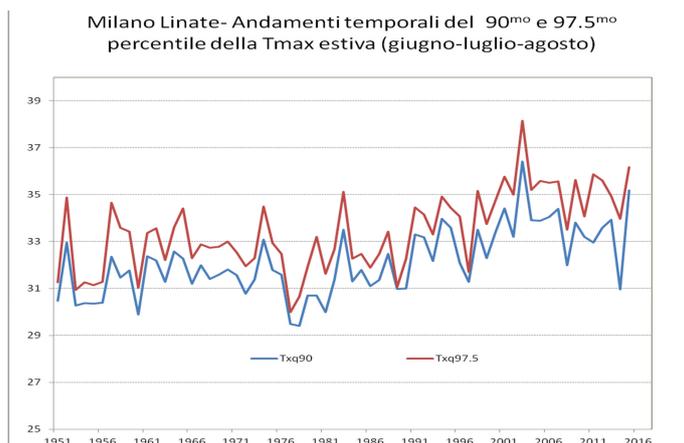


Figura 6. Andamento temporale delle due soglie (90 e 97.5mo percentile espressi in °C) della temperatura massima estiva per la stazione di Milano Linate sul periodo 1951-2017

Questa tendenza all'aumento dei valori delle soglie ha impatto anche su altri indicatori estremi di temperatura. Ad esempio, l'incremento del 10^{mo} percentile della temperatura minima ha portato ad un calo dei numeri di giorni con gelo e del numero di giorni con ghiaccio. Infatti, analizzando la tendenza di questi due indicatori, soprattutto per la stagione invernale, è stata evidenziata una tendenza alla diminuzione sia per Linate che per Brera. La Figura 7 mostra, come esempio, l'andamento di questi due indicatori invernali per la stazione di Brera, nel periodo 1951-2017. Nel periodo 1951-2017, si nota una diminuzione di circa 5 giorni nel numero di giorni con il gelo, mentre il numero di giorni con il ghiaccio è più frequente vicino a zero nel periodo che va dal 2000 ad oggi.

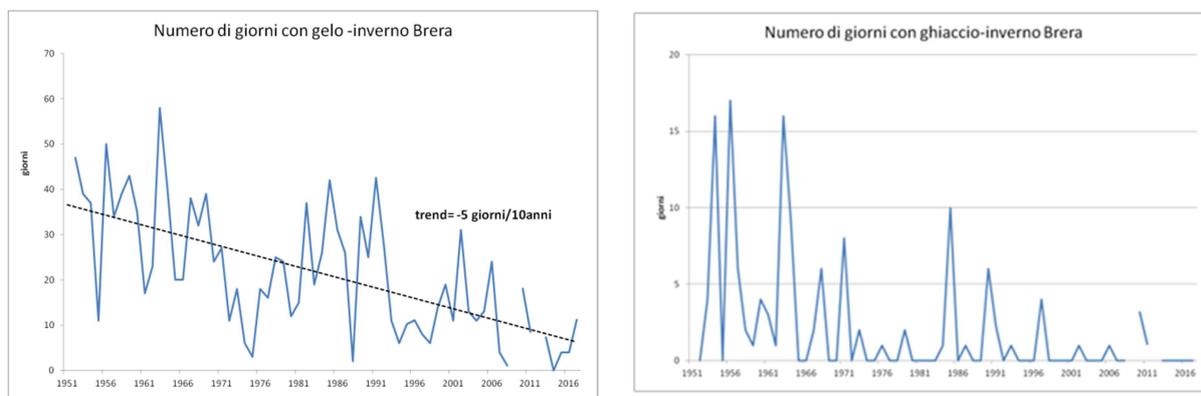


Figura 7. Andamento temporale del numero di giorni con gelo (sinistra) e ghiaccio (destra) a Brera sul periodo 1951-2017.

3.3. | Onde di calore e notti tropicali

Per quanto riguarda le soglie alte di temperatura (90^{mo} e 97.5^{mo}), l'incremento del valore della soglia sul lungo periodo, sottolineato nel paragrafo precedente, è seguito anche dall'incremento del numero massimo di giorni consecutivi con temperatura massima maggiore della soglia del 90^{mo} percentile, cioè la durata delle onde di calore. Questo segnale è stato trovato sia per Brera che per Milano Linate. Calcolando questo indicatore su tutta la lunghezza della serie e per varie stagioni (ogni stagione con il suo valore corrispondente alla soglia del 90^{mo} percentile) e analizzando il suo

trend, si evidenzia un aumento della durata delle onde di calore.

La Figura 8 mostra l'andamento dell'indicatore per Brera e per Milano Linate, durante la stagione estiva, con un filtro su 5 anni (linea rossa). Si osserva un periodo, compreso tra 1970-1980, con un numero basso di onde di calore, mentre dopo il 1991 è avvenuto un raddoppio, in media, delle onde di calore per le entrambe le stazioni. Un risultato simile a livello di città è stato ottenuto anche per Bologna, all'interno del progetto BlueAP (www.blueap.eu).

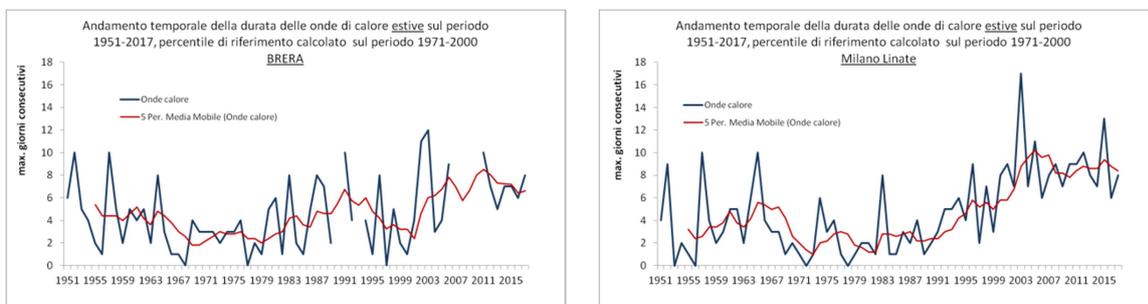


Figura 8. Andamento temporale delle onde di calore per le 2 stazioni: Brera e Milano Linate.

Un altro indicatore selezionato per descrivere l'evoluzione del clima della città metropolitana di Milano è stato il numero di giorni/notte con temperatura minima maggiore di 20°C, cioè il numero di notti tropicali. Anche in questo caso, come nel caso delle onde di calore, si è rilevata una tendenza all'incremento sia per Brera che per Milano Linate. La Figura 9 riporta l'andamento per entrambe le stazioni. Inoltre, confrontando i due periodi climatici 1961-1990 e 1991-2017, si nota un incremento, quasi un raddoppio, delle notti tropicali, sia nell'ambito urbano (Brera) che rurale (Milano Linate).

Questo indicatore, non essendo necessario un clima di riferimento, è stato calcolato anche per le altre stazioni dell'ambito urbano, Juvara e Zavattari, evidenziando un numero piuttosto elevato di notti tropicali. La Figura 10 presenta la distribuzione delle notti tropicali per tutte le stazioni disponibili.

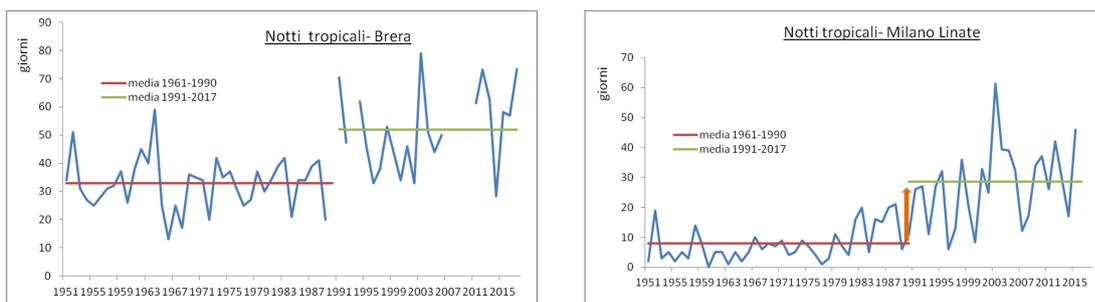


Figura 9. Notti tropicali estive: Brera (sinistra) e Linate (destra)

Nella Figura 10 si può osservare chiaramente la differenza tra ambito urbano e rurale. Inoltre, per Brera e Milano Linate, che possiedono dati storici, si osserva che dopo il 1990 è avvenuto un cambiamento nel clima dell'indicatore.

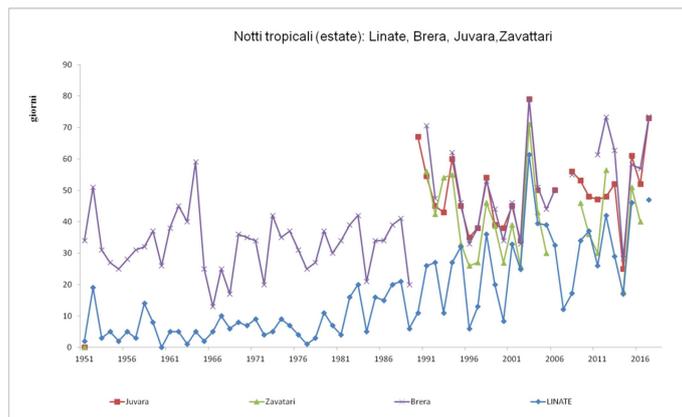


Figura 10. Notti tropicali estive, tutte le stazioni disponibili: Brera, Juvara, Zavattari (urbane) e Linate (rurale)

Osservando l'andamento della variabile di base, cioè la temperatura minima, si ottiene la stessa configurazione come nel caso dell'indicatore numero di notti tropicali (Figura 11). Questo comportamento evidenzia la presenza di isole di calore nella città metropolitana, anche molto più accentuato dopo il 1990, non solo in estate, ma anche per le altre stagioni (grafici non riportati).

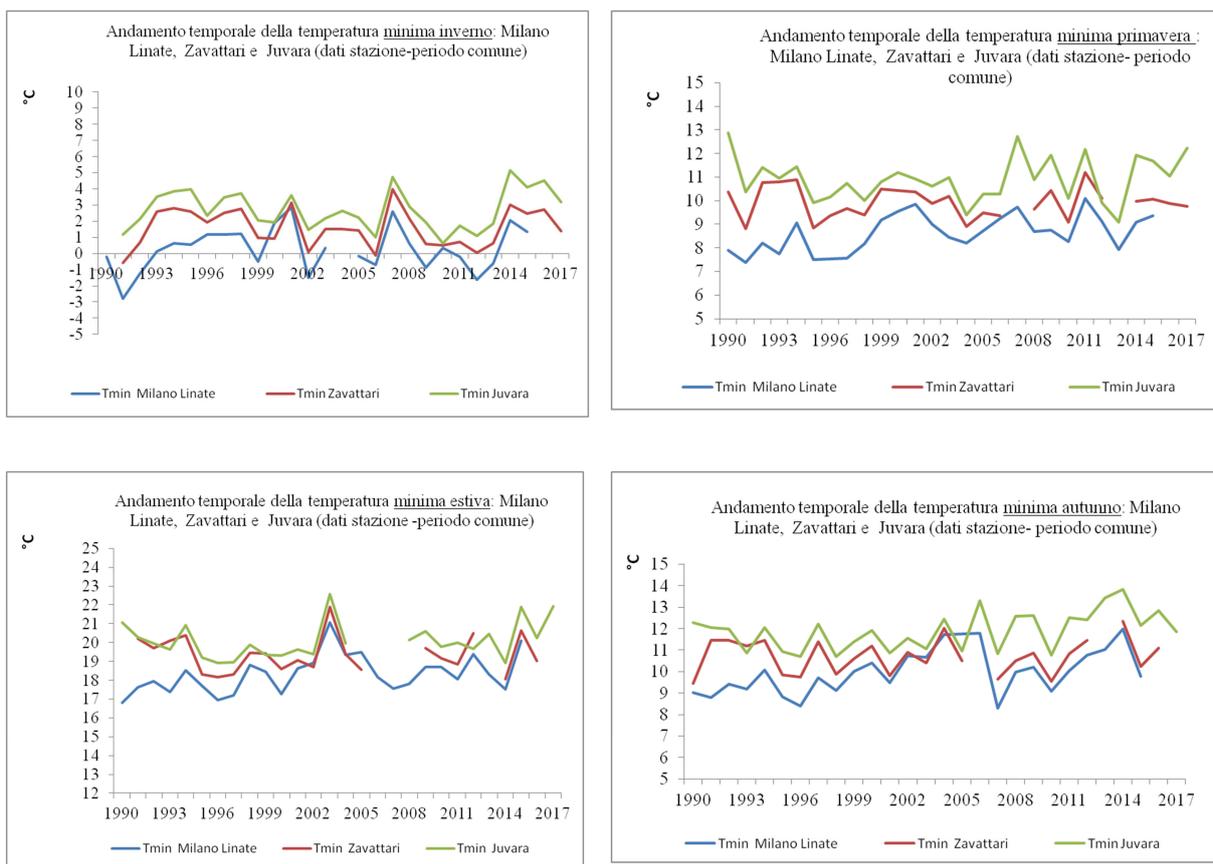


Figura 11 Temperatura minima stagionale: confronto tra ambiente urbano e rurale (°C)

4 | ANALISI CLIMATICA DELLE PRECIPITAZIONI STAGIONALI E ANNUE A MILANO: VALORI MEDI ED ESTREMI

4.1 | Precipitazione cumulata: tendenze e cambiamenti

Lo studio della variabilità climatica della quantità di precipitazione *annua* ha evidenziato un segnale di diminuzione. La Figura 12 mostra l'andamento temporale della cumulata annua per le stazioni disponibili e il trend della stazione di Milano Linate (linea tratteggiata).

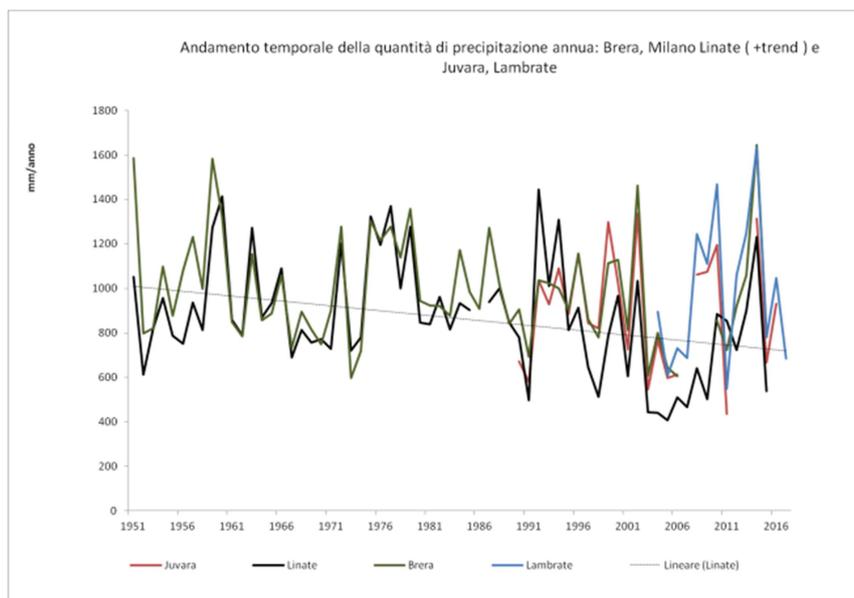


Figura 12. Andamento temporale della quantità annua di precipitazione

A livello *stagionale*, sul periodo 1951-2017, l'andamento temporale mostra sia per Brera che per Linate, una tendenza di diminuzione, leggermente più intensa durante l'estate. Il coefficiente di tendenza stagionale espresso in mm/decade è descritto nella Tabella 4.

	Inverno	Primavera	Estate	Autunno
Milano Linate	-11	-11	-15	-5
Brera	1.5	-2	-12	-6

Tabella 4. Tendenze (mm/decade) nelle precipitazioni stagionali sul periodo 1951-2017 per Brera e Linate

Calcolando le anomalie stagionali delle cumulate di precipitazione, rispetto al periodo di riferimento 1971-2000, si osserva per entrambe le serie storiche una prevalenza di anomalie negative dopo il 2000, soprattutto in inverno, primavera ed estate. La Figura 13 presenta, come esempio, la distribuzione delle anomalie di precipitazione per la stazione di Milano Linate.

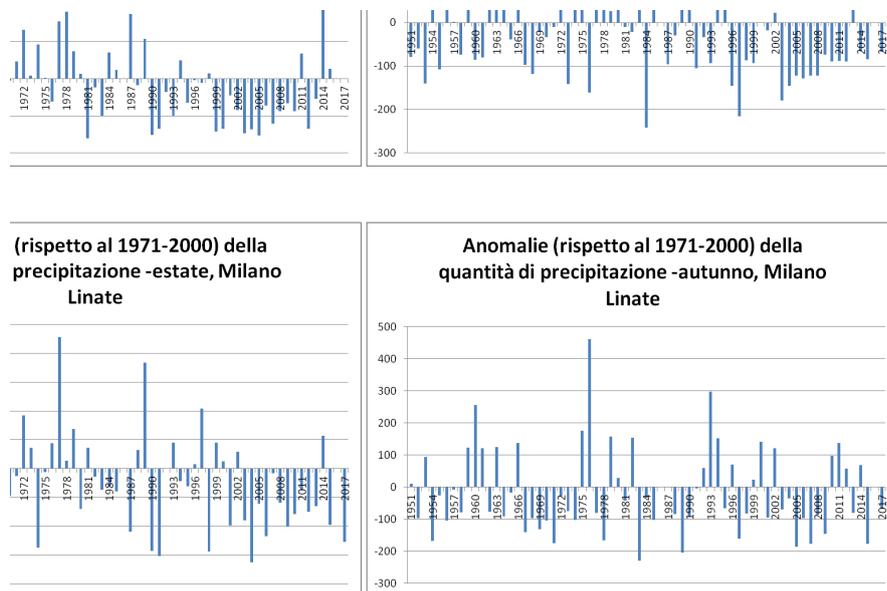
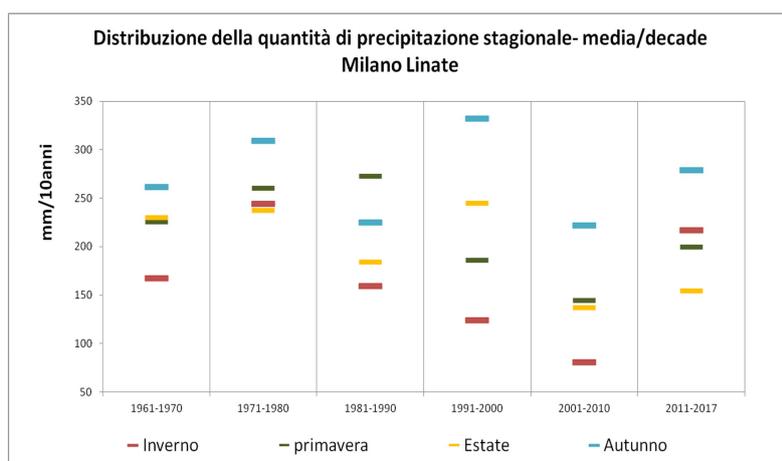


Figura 13 Andamento temporale dell'anomalia stagionale di precipitazione a Milano Linate: periodo 1951-2017

L'autunno, è la stagione che presenta un segnale più variegato, con la presenza anche di anomalie positive negli ultimi anni (Figura 13). Andando a studiare la distribuzione delle precipitazioni a livello di decade, dividendo il periodo dal 1951 ad oggi in 6 decadi, anche se l'ultima decade non è ancora completa, si nota che la decade più secca va dal 2001-2010 (Figura 14 – sinistra), rispetto al valore climatico di riferimento (Figura 14 - destra). Inoltre, sempre dalla Figura 14 si nota come le ultime due decadi sono state caratterizzate da un deficit di precipitazioni durante l'estate e l'autunno.



Clima	Prec(mm)
inverno	180
primavera	242
estate	228
autunno	289

Figura 14 Andamento temporale dell'anomalia stagionale di precipitazione a Milano Linate: periodo 1951-2017

4.2 | Estremi di precipitazione: frequenza degli eventi estremi e giorni secchi

Oltre ai trend delle precipitazioni cumulate è importante conoscere le variazioni della distribuzione delle precipitazioni, cioè la frequenza degli eventi estremi oppure la distribuzione dei giorni secchi e umidi durante la stagione o l'anno. Per questo studio sono stati scelti due indicatori: il numero di giorni con precipitazione maggiore del 90mo percentile (pnl90) e il numero massimo consecutivo di giorni senza precipitazioni (pxcdd). A livello annuo, la frequenza degli eventi estremi non mostra un segnale significativo, così come si può notare anche dalla Figura 15. Si possono invece evidenziare anni con un numero elevato di eventi, rispetto al valore climatico di riferimento, che è di circa 8 eventi/anno, sia per Milano Linate che per Brera.

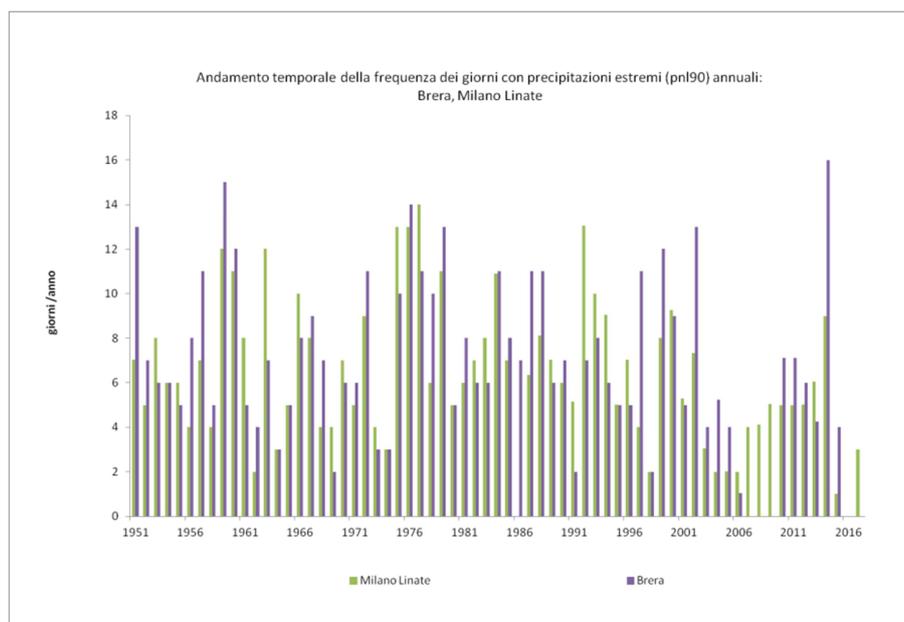


Figura 15. Andamento temporale della frequenza annua degli eventi estremi(pnl90): Brera e Linate, 1951-2017

A livello stagionale, l'indicatore (pnl90) mantiene lo stesso comportamento come a livello annuo, cioè non è stata trovata una tendenza significativa. La distribuzione stagionale degli eventi ha mostrato per entrambe le stazioni una distribuzione leggermente più alta in primavera. La Figura 16, mostra, come esempio, la distribuzione degli eventi per la stazione di Brera. Come si può notare, una buona percentuale di eventi (circa 31%) accade in primavera e in autunno (circa 28%), mentre poca differenza si nota tra l'estate e l'inverno.

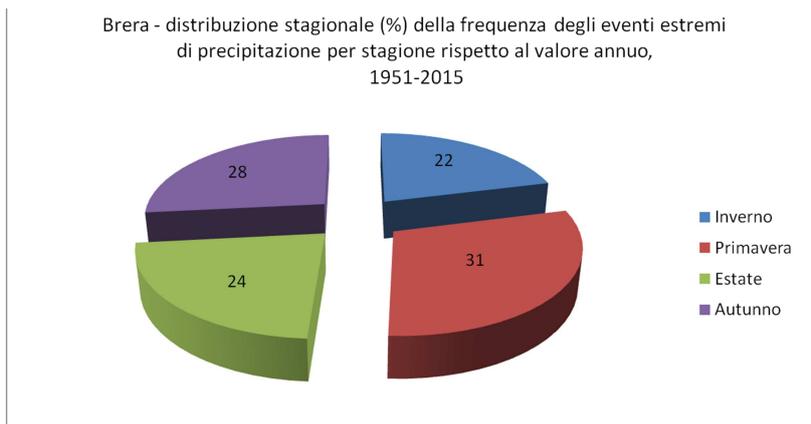


Figura 16. Distribuzione stagionale degli eventi estremi sul periodo 1951-2017, Brera

Un aumento è stato invece trovato nel numero massimo di giorni consecutivi senza precipitazione durante l'estate (pxcdd). La Figura 17 mostra l'andamento dell'indicatore durante l'estate per le stazioni con periodo storico dal 1951-oggi (Milano Linate e Brera) e per il periodo più breve con dati disponibili dal 1990 ad oggi (Juvara).

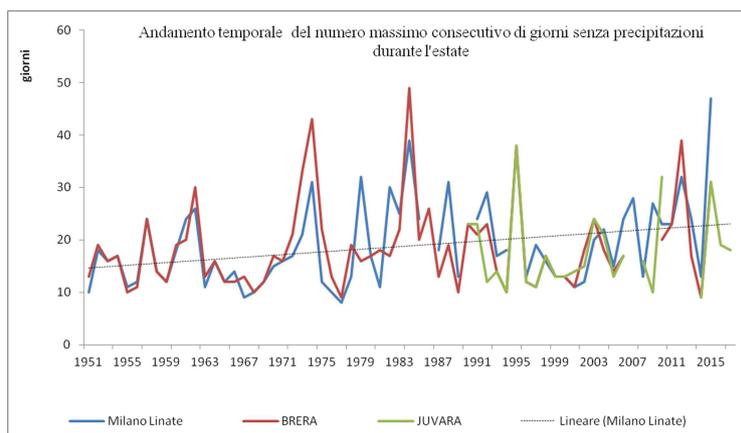


Figura 17. Andamento temporale del numero massimo consecutivo senza precipitazioni durante l'estate.

5 | CONCLUSIONI SULLA VARIABILITA' CLIMATICA OSSERVATA

I risultati del presente studio climatico sulla città metropolitana di Milano evidenziano i seguenti segnali climatici nel periodo **1951-2017**:

5.1 | Temperatura

- tendenze significative di aumento della temperatura minima, massima e media annua e stagionale, comprese tra 0.2°C/decade e 0.5°C/decade;
- il segnale diventa più intenso sul periodo 1961-2017, con un valore di aumento che tocca 0.6°C/decade durante l'estate;
- frequenti anomalie positive nelle temperature minime e massime dopo gli anni '90 con valori anche molto intensi (circa 3- 4 °C);
- tendenza all'aumento nei valori dei percentili di temperatura: bassi (10^{mo}), alte (90^{mo}) e molto alte (97.5^{mo});
- aumento delle onde di calore e notti tropicali estive, con un raddoppio dell'indicatore sul periodo 1991-2017, rispetto al periodo 1961-1990;
- netta differenza tra l'andamento climatico delle stazioni urbane e quella assimilabile a rurale, fatto che evidenzia la presenza di isole di calore sia estive che invernale;
- diminuzione del numero di giorni con gelo e ghiaccio;
- per tutti gli indicatori è stato notato un cambiamento nell'andamento dopo il 1990;

5.2 | Precipitazione

- le tendenze nelle cumulate, pur non statisticamente significative, evidenziano un calo sia a livello annuo che stagionale;
- la frequenza del numero di giorni con precipitazione maggiore del 90^{mo} percentile non mostra una tendenza significativa a livello stagionale; il numero maggiore di eventi, sul periodo 1951-2017, è avvenuto durante la stagione primaverile seguita dall'autunno;
- tendenza ad aumento del numero massimo consecutivo di giorni secchi durante l'estate.

Fase B

Elaborazione di scenari climatici futuri

**con focus sugli indicatori estremi
identificati nella Fase A**

6 | PROIEZIONI CLIMATICHE FUTURE - QUADRO GENERALE

I cambiamenti climatici rappresentano una sfida urgente per la società e per il pianeta in generale. La valutazione dei cambiamenti climatici futuri viene affidata ai modelli climatici. I modelli climatici globali (GCMs) costituiscono uno dei principali strumenti per lo studio di questi cambiamenti ma, non sempre la loro risoluzione spaziale è sufficiente per rappresentare i fenomeni che avvengono su scala locale. Per incrementare la risoluzione spaziale, e tenere conto perciò degli effetti locali, negli ultimi anni sono state sviluppate tecniche di "regionalizzazione", sia di tipo dinamico (RCMs) che di tipo statistico (SD). Tutti questi strumenti permettono di formulare scenari di cambiamento climatico a diverse scale spaziali, ma, presentano un certo grado di incertezza. Vari studi hanno dimostrato che la riduzione dell'incertezza può essere affrontata ricorrendo a due approcci diversi: definire uno scenario futuro più probabile mediante la tecnica di "ensemble", cioè mediante l'utilizzo di più modelli insieme, o l'utilizzo di scenari emissivi diversi. Per quanto riguarda gli scenari emissivi, nell'ultimo Rapporto di valutazione dell'International Panel for Climate Change IPCC (AR5, 2014) è descritto un set di 4 scenari, denominati Representative Concentration Pathways (RCP), identificati dalla loro forzante radiativa, essendo rappresentativi di un ventaglio di politiche climatiche da adottare nel XXI secolo. Questi scenari includono: uno scenario di mitigazione (RCP2.6), due scenari di stabilizzazione (RCP4.5 e RCP6.0) e uno scenario con emissioni di gas serra molto alte (RCP8.5). Mentre gli scenari RCP abbracciano un ampio spettro di valori della forzante totale, non coprono la gamma completa di emissioni della letteratura scientifica, in particolare per quanto riguardano gli aerosol.

La figura 1 mostra l'andamento della concentrazione di CO₂ nei diversi scenari emissivi (RCPs dell'IPCC-AR5 e SRESS dell'IPCC-AR4). Come si può notare, le concentrazioni prestabilite di CO₂ sono pari a 421 ppm (RCP2.6), 538 ppm (RCP4.5), 670 ppm (RCP6.0) e 936 ppm (RCP8.5) entro il 2100. Includendo anche le concentrazioni definite di CH₄ e N₂O, le concentrazioni combinate di anidride carbonica equivalente (CO₂-eq) sono pari a 475 ppm (RCP2.6), 630 ppm (RCP4.5), 800 ppm (RCP6.0), e 1313 ppm (RCP8.5).

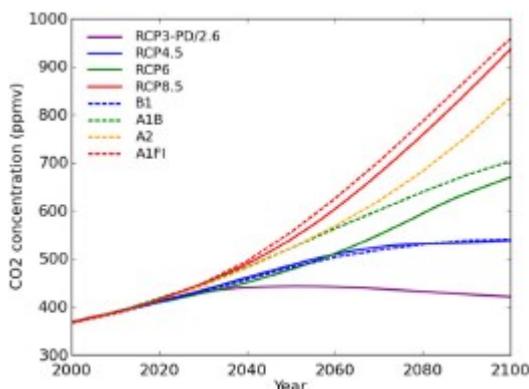


Figura 18. Andamento della concentrazione di anidride carbonica nei vari scenari emissivi (SRESS)- e radiativi (RCPs). (fonte: Australian Climate Change Climate Programme)

Come sottolineato in precedenza, le simulazioni climatiche vengono effettuate nell'ambito di vari scenari emissivi e coprono orizzonti temporali che si estendono fino alla fine del XXI secolo. In questo lavoro, le simulazioni climatiche si riferiscono al periodo 2021-2050. Come si può vedere dalla figura 1, per questo periodo futuro, non c'è una significativa differenza tra gli scenari emissivi, la differenza

nella concentrazione di gas serra diventa più significativa dopo il 2050. Per questa ragione è stato scelto come scenario emissivo per le elaborazioni climatiche per area di Milano, lo scenario di stabilizzazione RCP4.5.

Cosa dicono gli scenari climatici a livello globale e sulla penisola Italiana?

Le simulazioni climatiche presentate nei vari rapporti dell'IPCC, evidenziano un segnale di aumento della **temperatura** media dell'aria su tutto il globo, con un valore medio di circa 0.6°C per il periodo 2011-2030 (per lo scenario SRES A1B) e tra 1.3-2°C nel periodo 2046-2065 (sia per gli scenari SRES che RCP), mentre a fine secolo l'aumento medio potrà essere di circa 4.5°-5°C. Il riscaldamento continuerà oltre il 2100 secondo tutti gli scenari RCP, eccetto RCP2.6. Inoltre, come sottolinea l'ultimo rapporto dell'IPCC, il riscaldamento continuerà a mostrare una variabilità da interannuale a decennale e non sarà uniforme a livello regionale, quindi è necessario uno studio approfondito quando si scende di scala.

Per quanto riguarda le **precipitazioni**, secondo lo scenario RCP8.5, è probabile che le regioni alle alte latitudini e l'Oceano Pacifico equatoriale sperimenteranno un aumento della precipitazione media annua per la fine di questo secolo. In molte regioni secche alle medie latitudini e della città metropolitana sub-tropicale, le precipitazioni probabilmente diminuiranno, mentre in molte regioni umide alle medie latitudini, le precipitazioni probabilmente aumenteranno per la fine di questo secolo. Secondo tutti gli scenari è atteso un aumento della frequenza degli eventi estremi di temperatura e precipitazione (siccità, ondate di calore, precipitazioni intense) soprattutto nella città metropolitana del Mediterraneo ed Europa meridionale (IPCC-AR5, 2014).

Per la penisola italiana, sono state fatte simulazioni climatiche nell'ambito di vari progetti, come ad esempio: Stardex⁴, Prudence⁵, Ensembles⁶, Adaptalp⁷, Agros scenari⁸, BlueAp⁹, Primes¹⁰. I risultati dei lavori sono confluiti nella Strategia Nazionale di Adattamento ai Cambiamenti Climatici¹¹ (Castellari et al., 2014), nel Piano Nazionale di Adattamento ai Cambiamenti Climatici¹² (PNACC), nelle strategie regionali (ad esempio quelle della Regione Lombardia e della Regione Emilia-Romagna), ma anche nei piani locali di adattamento ai cambiamenti climatici (ad esempio quelli di Bologna e di Ancona).

Le proiezioni presentate nel PNACC mostrano, per la penisola italiana, un generale aumento della temperatura media dell'aria in tutte le stagioni, in media di circa 2°C sul periodo 2021-2050 (RCP4.5 e RCP8.5); mentre per quanto riguarda la precipitazione, il segnale è più variegato, con in generale una riduzione in primavera e in estate. L'inverno, invece, è caratterizzato da una lieve riduzione di precipitazione, che interessa le Alpi e il sud Italia, e un leggero aumento in Sardegna e nella pianura padana. Infine in autunno si osserva un lieve aumento delle precipitazioni, ad eccezione della Puglia. Scenari simili di cambiamento climatico sono ottenuti anche a livello regionale, ad esempio per la Regione Emilia-Romagna (<http://ambiente.regione.emilia-romagna.it/sviluppo-sostenibile/temi/cambiamenti-climatici/strategia-regionale-per-i-cambiamenti-climatici>).

Il rapporto di sintesi della Strategia Regionale di Adattamento ai Cambiamenti Climatici per la

⁴ <http://www.cru.uea.ac.uk/stardex>

⁵ <http://prudence.dmi.dk>

⁶ <http://www.ensembles-eu.org>

⁷ <http://www.adaptalp.org>

⁸ <http://www.agros scenari.it/>

⁹ www.blueap.eu/site/

¹⁰ <http://www.lifeprimes.eu/>

¹¹ http://www.pdc.minambiente.it/sites/default/files/allegati/Strategia_nazionale_adattamento_cambiamenti_climatici_ci.pdf;

¹² <http://www.minambiente.it/pagina/consultazione-su-piano-nazionale-adattamento-cambiamenti-climatici>

regione Lombardia (http://www.regione.lombardia.it/wps/wcm/connect/841f23be-02ea-423c-b868-052cc92b6578/Allegato+alla+Comunicazione_Rapporto+di+sintesi_DEF.pdf?MOD=AJPERES&CACHEID=841f23be-02ea-423c-b868-052cc92b6578) evidenzia, per il periodo 2021-2050 e secondo lo scenario emissivo A1B, un aumento medio della temperatura dell'aria in regione di circa 1.5°C (rispetto al periodo di riferimento 1961-1990), con aumenti previsti più intensi soprattutto nella stagione estiva (+ 2°C) rispetto a quella invernale (+1°C). Anche per quanto riguarda le proiezioni a fine secolo (2071-2100), i modelli regionali concordano nel prevedere un aumento delle temperature medie di circa (+) 3.5°C, con aumenti più bassi per la stagione invernale (tra 3 e 4°C) e aumenti fino a circa 5°C per il periodo estivo. Inoltre per le precipitazioni, le proiezioni presentate nella SRACC della Regione Lombardia non indicano una variazione statisticamente significativa per il periodo 2021-2050.

A scale più piccole, quella di provincia oppure di città, il segnale può subire delle variazioni sia come intensità che come segno (aumento o diminuzione), perciò è necessario scendere di scala utilizzando tecniche specifiche, come la regionalizzazione statistica (SDs).

Di seguito vengono presentati gli scenari di cambiamento climatico per l'area di Milano, costruiti sul periodo 2021-2050 rispetto al periodo 1971-2000, nell'ambito dello scenario emissivo RCP4.5.

Siccome lo studio della variabilità climatica osservata (report Fase A della convenzione) ha evidenziato per l'area di Milano dei segnali significativi per alcuni indicatori, le proiezioni climatiche riguardano solo i seguenti indicatori:

- temperature minime e massime stagionali;
- onde di calore estive;
- notti tropicali estive;
- quantità di precipitazione stagionale;
- numero massimo di giorni consecutivi senza precipitazione.

7 | MODELLO DI REGIONALIZZAZIONE STATISTICA (SDs)

Le proiezioni climatiche costruite nell'ambito di questo lavoro sono ottenute mediante l'uso della tecnica di regionalizzazione statistica (SDs), che consente di definire le proiezioni climatiche stagionali alla scala d'interesse (es. città).

Il modello di regionalizzazione è una regressione statistica multivariata basata sulla tecnica delle correlazioni canoniche (CCAReg model, Tomozeiu et al 2017). Questa tecnica permette di collegare variabili atmosferiche a "grande scala" meglio simulate dai modelli climatici globali (es: temperatura a 850hPa) con grandezze a "scala locale" (temperature minime, massime, precipitazioni) in modo tale che sia massima la correlazione fra le loro rispettive serie temporali.

Siccome la tecnica di downscaling statistico (SDs) necessita per la sua costruzione e validazione delle serie temporali storiche (almeno 40 anni di dati), continue e uniformemente distribuite sulla città metropolitana di studio, in questo lavoro sono stati utilizzati i dati giornalieri di temperatura e precipitazione anche dell'analisi E-OBS¹³ ultima versione (v.17), con la risoluzione di 0.25°x 0.25°, periodo 1959-2015. In figura 2 sono rappresentate le due stazioni storiche (Brera e Milano Linate; punti rossi), sulle quali è stata costruita l'analisi della variabilità climatica osservata, e i punti di griglia dell'analisi E-OBS (cerchi), selezionati per la costruzione del modello di regionalizzazione statistica. Solo per i punti inclusi nel riquadro verde di figura 2 sono presentati di seguito i risultati degli scenari di cambiamento climatico per l'area di Milano.

Il primo step del processo, consiste nel set-up (costruzione e validazione) del modello di regionalizzazione statistica (CCAReg), utilizzando i campi in quota (geopotenziale a 500hPa-Z500, temperatura a 850hPa-T850, pressione a livello del mare-MSLP) provenienti dai due data set di ri-analisi ERA40+ERA Interim¹⁴ (dati di larga scala), con la risoluzione di 2.5°x 2.5°, e dati a scala locale cioè gli indicatori di temperatura e precipitazione nei punti di griglia dell'area metropolitana di studio (figura 2). Per ogni indicatore climatico calcolato in ogni punto di griglia (cerchi nella figura 2) e stagione è stato costruito il modello statistico CCAReg, utilizzando i dati osservati nei periodi 1959-1978 e 2000-2010, e poi validato sul periodo 1979-1999. La performance del modello è stata testata attraverso coefficienti di skill (coefficiente di correlazione, la tendenza a deviare dal valore medio - BIAS, errore quadratico medio - RMSE) calcolati tra i dati osservati e quelli simulati sul periodo 1979-1999.

¹³ <http://www.ecad.eu/download/ensembles/ensembles.php>

¹⁴ <https://www.ecmwf.int/>

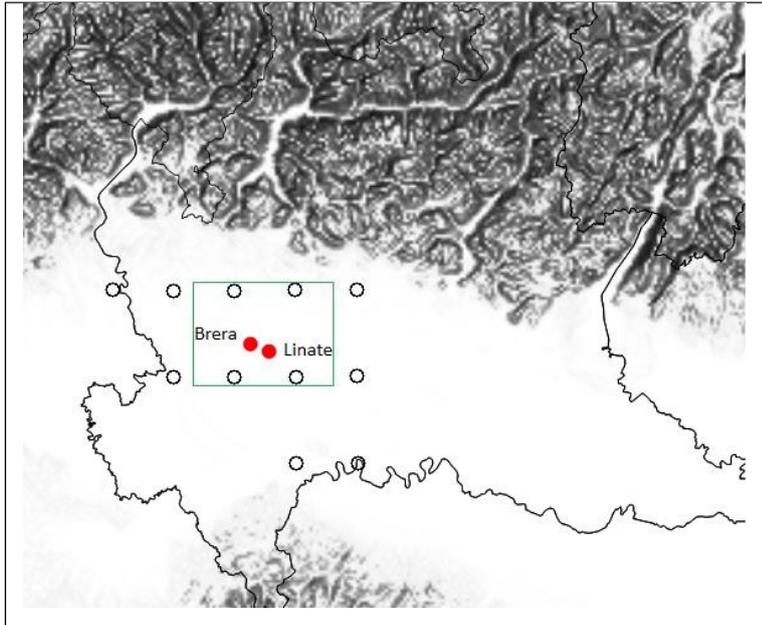


Figura 19. Mappa con i punti di griglia del dataset E-OBS, utilizzato per l'impostazione del modello di regionalizzazione (CCAReg) degli scenari climatici di temperatura e precipitazione nell'area di Milano.

Nel secondo step, al modello di regionalizzazione statistica CCAReg, costruito in precedenza con i dati climatici osservati, sono stati poi applicati i campi in quota simulati dai modelli climatici globali (GCM: CMCC-CM, CNRM e MPI), per il periodo di controllo 1971-2000 e 2021-2050, nell'ambito dello scenario emissivo RCP4.5.

Il modello climatico globale CMCC-CM, è un modello di circolazione generale accoppiato atmosfera-oceano, implementato e sviluppato a partire dal modello climatico SINTEX-G (SXG) (Gualdi et al. 2008, Scoccimaro et al. 2011) e dal modello di Ciclo del Carbonio del CMCC. La componente atmosferica di CMCC-CM, è costituita dal modello atmosferico ECHAM5, con una risoluzione orizzontale di circa $0.75^{\circ} \times 0.75^{\circ}$ (circa 80 km). Oltre al modello climatico globale CMCC-CM, sono stati utilizzati campi in quota provenienti da altri due modelli climatici globali, cioè MPI-ESM-MR (Max Planck Institute) con la risoluzione $1.87^{\circ} \times 1.87^{\circ}$, e CNRM (Centre National de Recherches Meteorologiques) con la risoluzione $1.40^{\circ} \times 1.40^{\circ}$. Vista la risoluzione diversa dei 3 modelli globali, tutti i campi di larga scala (T850, MSLP, Z500) sono portati alla stessa risoluzione del dataset ERA40, cioè $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$.

8 | PROIEZIONI FUTURE DELLA TEMPERATURA MINIMA E MASSIMA: VALORI MEDI ED ESTREMI

8.1 | Temperatura minima e massima stagionale

Gli scenari di cambiamento climatico durante il periodo 2021-2050 costruiti attraverso il modello CCAReg, applicato ai campi in quota dei modelli globali CMCC-CM, MPI, CNRM, mostrano per l'area di Milano un possibile incremento della temperatura minima stagionale compreso tra circa 1.3°C e 2.2°, rispetto al periodo di riferimento 1971-2000 (figura 3). Come si può notare nella figura 3, che presenta il cambiamento medio dei 3 modelli statistici applicati alle uscite dei 3 modelli globali (Ensemble Mean), l'estate è la stagione con l'aumento maggiore (circa 2.2°C), mentre un aumento più piccolo è previsto per l'inverno e l'autunno.

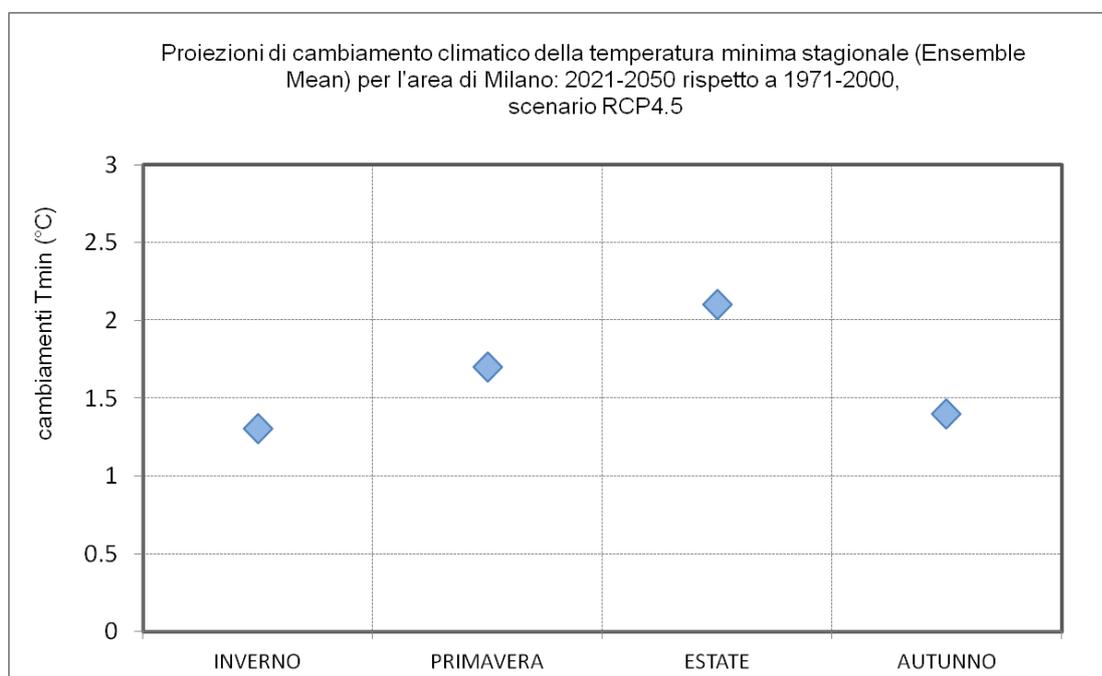


Figura 20. Proiezioni di cambiamento della temperatura minima stagionale per l'area di Milano: Ensemble Mean del modello CCAReg applicato ai modelli globali CMCC-CCM, MPI, CNRM; scenario RCP4.5.

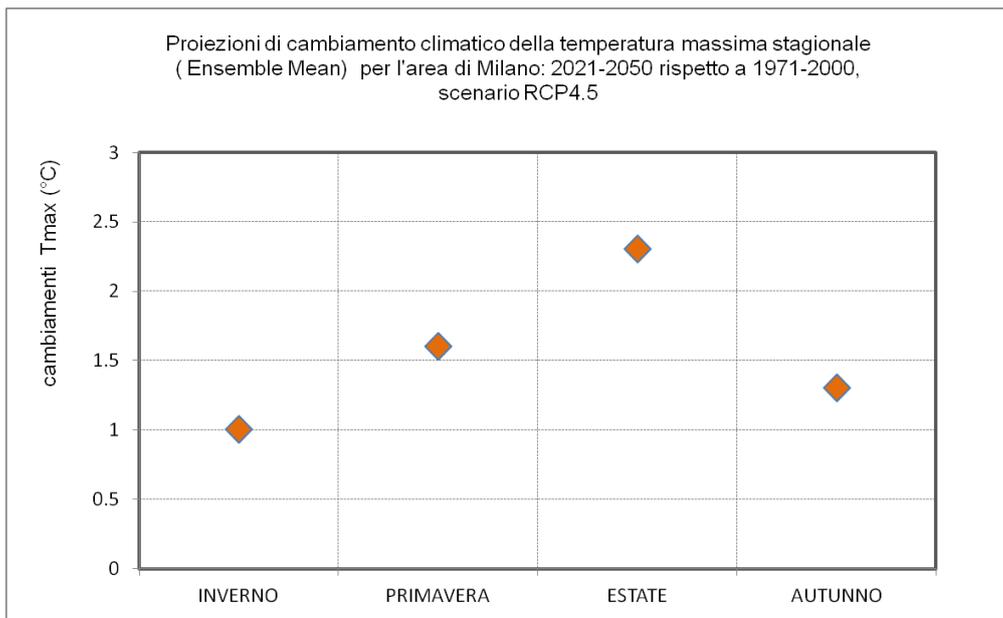


Figura 21. Proiezioni di cambiamento della temperatura massima stagionale per la città metropolitana di Milano: Ensemble Mean del modello CCAReg applicato ai modelli globali CMCC- CCM, MPI, CNRM; scenario RCP4.5.

Un segnale simile è stato ottenuto anche per la temperatura massima, con valori di aumento stagionale compresi tra 1°C (durante l'inverno) e circa 2.3°C (durante l'estate). La figura 4 presenta il segnale di cambiamento della temperatura massima stagionale per il periodo 2021-2050 rispetto al periodo 1971-2000, scenario RCP4.5. Come nel caso della temperatura minima, si può notare che l'estate è seguita dalla stagione primaverile come intensità dell'aumento della temperatura massima, con un incremento di circa 1.5°C.

Come viene tradotto questo aumento della temperatura minima e massima nel valore stagionale della temperatura?

La figura 5 presenta per la stazione di Milano (Brera) la funzione di distribuzione della densità di probabilità (Pdf - Ensemble Mean) per la temperatura minima (5a) e massima (5b) estiva, presente (1971-2000) e futura (2021-2050).

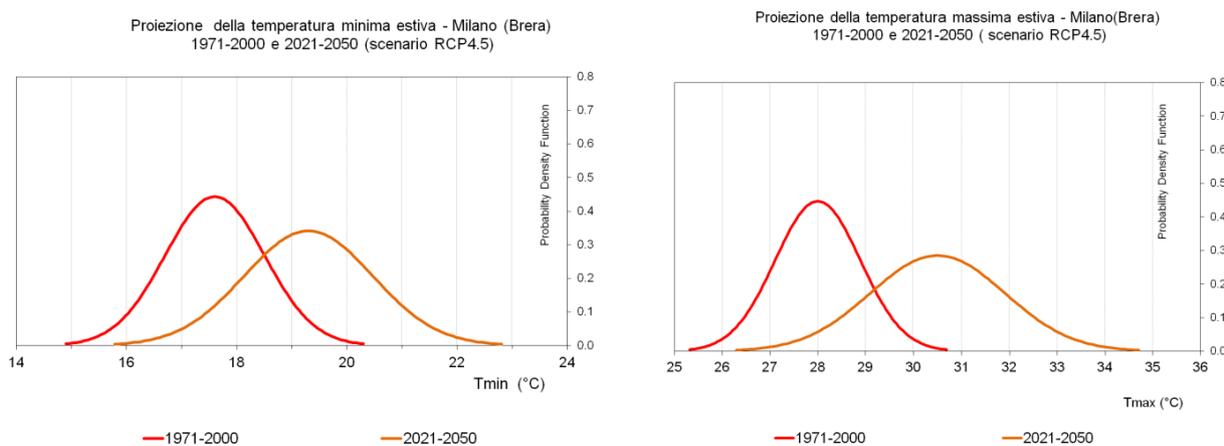


Figura 22. Estate: presente e futuro; temperatura minima (a) e massima (b); scenario emissivo RCP4.5; area di Milano.

Come si può notare durante l'estate, sia per la temperatura minima che per la temperatura massima, è l'intera distribuzione che si sposta verso i valori più caldi. Nel caso della temperatura minima, sul periodo di riferimento 1971-1990, il 90mo percentile è più vicino alla media del periodo futuro 2021-2050. Inoltre, la curva del futuro mostra una probabilità più alta di superamento del valore di 20°C (valore estremo per la Pdf del presente), rispetto al periodo 1971-2000.

La temperatura massima ha un andamento simile alla minima (figura 5b), cioè uno spostamento verso valori caldi dell'intera distribuzione, con un valore medio (il valore centrale della distribuzione) che passa da circa 28.2°C per il periodo 1971-2000 a circa 30.5°C per il periodo 2021-2050. La coda di destra della distribuzione (figura 5b) indica nel futuro valori di fino a 35°C.

8.2 | Estremi di temperatura

Lo spostamento delle curve di distribuzione della temperatura futura presentate in precedenza (figura 5), ha già evidenziato possibili cambiamenti anche negli eventi estremi di temperatura durante l'estate.

Questa ipotesi è stata confermata dal modello di downscaling statistico (CCAReg) costruito proprio per le serie degli indicatori degli eventi estremi e per le stagioni d'interesse. Anche in questo caso la costruzione del modello è stata realizzata sui periodi 1959-1978 e 2000-2010, e la validazione è stata fatta sul periodo 1979-1999.

Gli scenari del numero di giorni invernali con gelo mostrano una diminuzione di circa - 15 giorni per l'area di Milano (figura 6), nel periodo 2021-2050 rispetto al periodo 1971-2000. Questa diminuzione è stata ottenuta applicando il modello CCAReg per ogni modello globale, CMCC-CM, MPI, CNRM. La figura 6 mostra gli scenari di cambiamento ottenuti per ogni modello e per l'Ensemble Mean. Come si può notare, la diminuzione varia tra -12 giorni e -17 giorni, rispetto al periodo 1971-2000, con lo scenario RCP4.5.

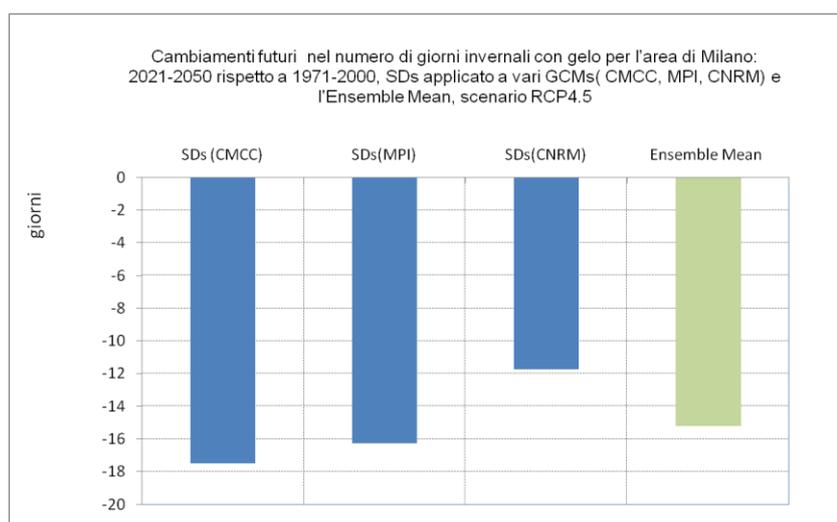


Figura 23. Proiezioni di cambiamento nel numero di giorni con gelo, inverno 2021-2050 rispetto al 1971-2000; scenario emissivo RCP4.5; area di Milano.

Per la stagione estiva, sono stati prodotti scenari di cambiamento climatico per le notti tropicali e la durata massima delle onde di calore.

Per quanto riguarda le notti tropicali, cioè quando la temperatura minima è maggiore di 20°C, le proiezioni sul periodo 2021-2050 indicano un aumento di circa 24 giorni rispetto al periodo 1971-2000 (Ensemble Mean- figura 7), partendo da circa 17 giorni previsti dal modello CNRM e i 28 giorni previsti dal modello CMCC-CM (figura 7).

Un aumento significativo si evidenzia anche per la durata delle onde di calore, cioè il numero massimo consecutivo di giorni con la temperatura massima maggiore del 90mo percentile giornaliero, calcolata sul periodo 1971-2000. Il modello CCAReg ha evidenziato quasi un raddoppio dell'indicatore sul periodo 2021-2050 rispetto al periodo 1971-2000. La figura 8 presenta per l'area di Milano il valore dell'indicatore nel clima presente, circa 3 giorni consecutivi, e nel clima futuro. Come si può notare, gli scenari concordano sia nel segno che nell'intensità, cioè un cambiamento compreso tra 5^{1/2} giorni (SDs applicato al CMCC e CNRM) e 6 giorni (Sds applicato al modello MPI).

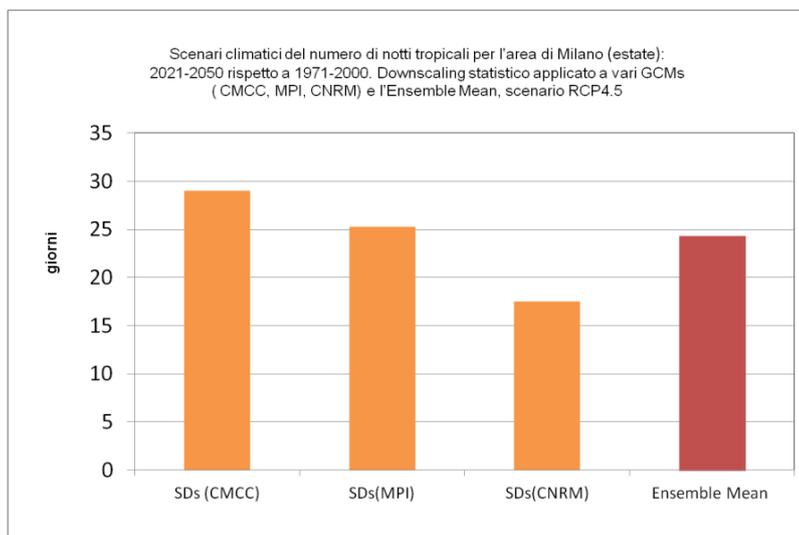


Figura 24. Proiezioni del numero di notti tropicali estive: 2021-2050 rispetto al 1971-2000, con scenario emissivo RCP4.5; area di Milano.

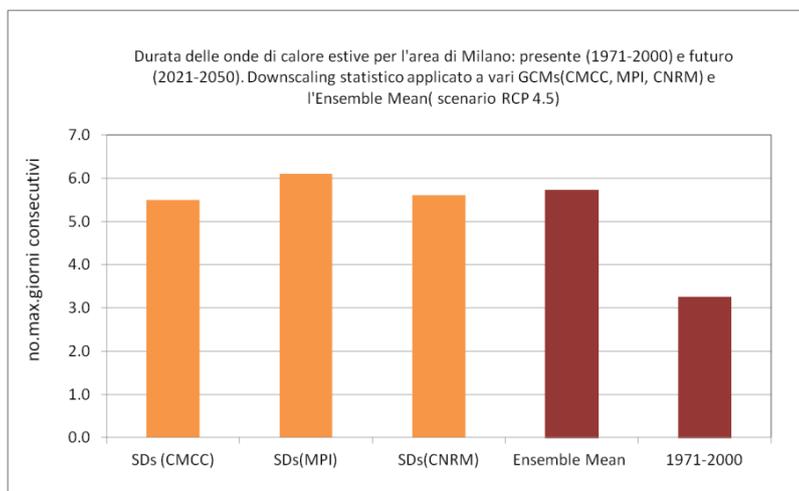


Figura 25. Onde di calore estive: 2021-2050 rispetto al 1971-2000, con scenario emissivo RCP4.5; area di Milano

9 | PROIEZIONI FUTURE DELLE PRECIPITAZIONI STAGIONALI: VALORI MEDI ED ESTREMI

9.1 | Precipitazione cumulata

Per quanto riguarda le precipitazioni stagionali, le proiezioni climatiche per il trentennio 2021-2050, costruite sempre attraverso la tecnica SDs, applicata solo al modello climatico globale CMCC-CM e per lo scenario RCP4.5, mostrano un segnale di diminuzione in tutte le stagioni.

La figura 9 riporta il segnale di cambiamento della precipitazione stagionale per il periodo 2021-2050 rispetto al periodo 1971-2000, espresso in %, per l'area di Milano, scenario emissivo RCP4.5.

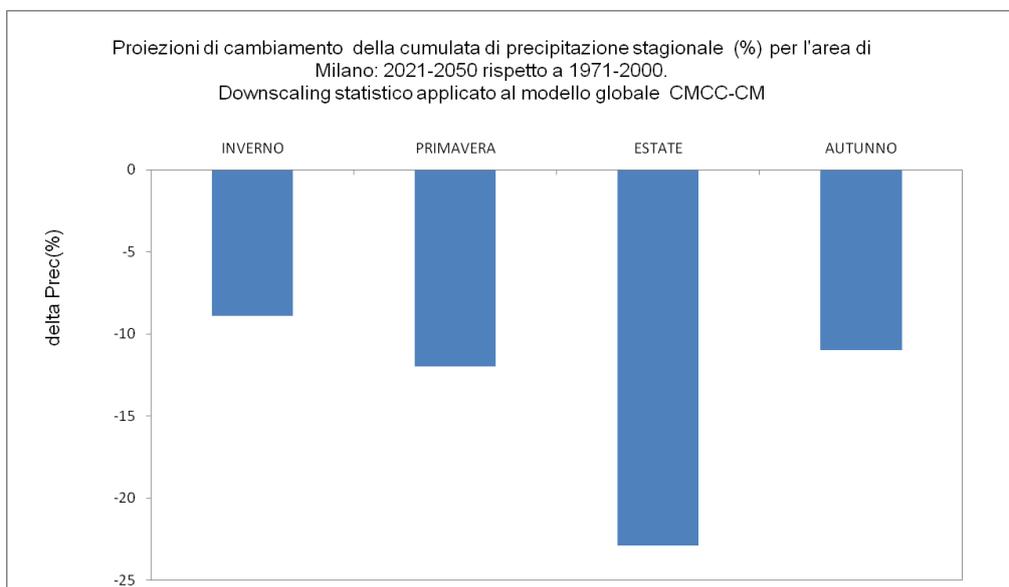


Figura 26. Scenari di cambiamento della cumulata della precipitazione stagionale (%): periodo 2021-2050 rispetto al periodo 1971-2000, scenario emissivo RCP4.5; area di Milano.

Come si può notare, la diminuzione più significativa è prevista durante l'estate (circa - 23%), mentre l'inverno è la stagione con il segnale di diminuzione più limitato (circa - 7%) .

9.2 | Giorni secchi

Le proiezioni del numero massimo di giorni consecutivi senza precipitazioni hanno evidenziato un segnale positivo più evidente durante l'inverno e la primavera. L'autunno è la stagione che non mostra un cambiamento per questo indicatore (figura 10).

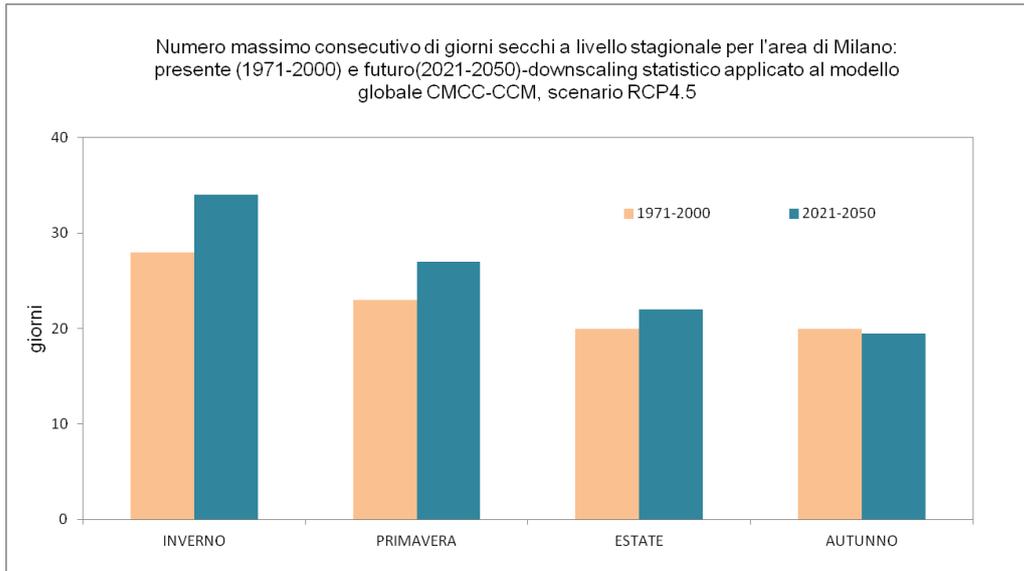


Figura 27. Scenari di cambiamento del numero massimo di giorni secchi consecutivi, periodo 2021-2050 rispetto al periodo 1971-2000, scenario emissivo RCP4,5; area di Milano.

10 | CONCLUSIONI SUGLI SCENARI CLIMATICI FUTURI

I risultati del presente studio climatico sull'area di Milano evidenziano i seguenti segnali climatici nel periodo 2021-2050:

per quanto riguarda le temperature:

- un probabile incremento medio delle temperature minime e massime compreso tra 1 e 2,3 °C per il periodo 2021-2050 rispetto al periodo di riferimento climatico 1971- 2000; le anomalie più forti potranno verificarsi durante il periodo estivo, sia nelle minime che nelle massime;
- un probabile aumento delle ondate di calore e delle notti tropicali estive;
- una probabile diminuzione del numero di giorni con gelo durante la stagione invernale.
- per quanto riguarda le precipitazioni:
- un possibile calo della quantità di precipitazione stagionale, più marcato nell'estate, quando la diminuzione potrà essere di circa -23%;
- un probabile aumento del massimo numero di giorni consecutivi senza precipitazione in tutte le stagioni, tranne per l'autunno.

11 | BIBLIOGRAFIA

11.1 | Fase A

- Brunetti M., Maugeri M., Monti F., Nanni T., 2006. Temperature and precipitation variability in Italy in the last two centuries from homogenised instrumental time series. *Int. J. Climatol.* 26: 345–381
- IPCC, 2013: Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia,
- V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Maugeri M., Bufoni L., Del Monte B., Fassina A., 2002: Daily Milan temperature and pressure time series (1763–1998): Completing and homogenising the data, *Climatic Change* 53: 119–149, 2002.
- Maugeri, M., Buffoni, L., and Chlistovsky, F., 2002, 'Daily Milan Temperature and Pressure Series (1763–1998): History of the Observations and Data and Metadata Recovery', *Climatic Change* 53
- Pavan V, Antolini G, Barbiero R, Berni N, Brunier F, Cacciamani C, Cagnati A, Cazzuli O, Cicogna A, De Luigi C, Di Carlo E, Francioni M, Maraldo L, Marigo G, Micheletti S, Onorato L, Panettieri E, Pellegrini U, Pelosini R, Piccinini D, Ratto S, Ronchi C, Rusca L, Sofia S, Stelluti M, Tomozeiu R, Torrigiani Malaspina T., 2018. High resolution climate precipitation analysis for north-central Italy, 1961–2015. *Clim Dyn*, DOI 10.1007/s00382-018-4337-6
- SRAC Lombardia- *Strategia Regionale di Adattamento ai Cambiamenti Climatici per la regione Lombardia*: http://www.regione.lombardia.it/wps/wcm/connect/841f23be-02ea-423c-b868-052cc92b6578/Allegato+alla+Comunicazione_Rapporto+di+sintesi_DEF.pdf?MOD=AJPERES&CACHEID=841f23be-02ea-423c-b868-052cc92b6578
- Castellari S., Venturini S., Giordano F., Ballarin Denti A., Bigano A., Bindi M., Bosello F., Carrera L., Chiriaco M.V., Danovaro R., Desiato F., Filpa A., Fusani S., Gatto M., Gaudio D., Giovanardi O., Giupponi C., Gualdi S., Guzzetti F., Lapi M., Luise A., Marino G., Mysiak J., Montanari A., Pasella D., Pierantonelli L., Ricchiuti A., Rudari R., Sabbioni C., Sciortino M., Sinisi L., Valentini R., Viaroli P., Vurro M., Zavatarelli M., 2014. Elementi per una Strategia Nazionale di Adattamento ai Cambiamenti Climatici. Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare, Roma. (<http://www.minambiente.it/notizie/strategia-nazionale-di-adattamento-ai-cambiamenti-climatici-0>)
- Tomozeiu R., Busuioc A., Marletto V., Zinoni F., Cacciamani C., 2000. Detection of changes in the summer precipitation time series of the region Emilia-Romagna, Italy, *Theoretical and Applied Climatology*, 67, 193–200.
- Toreti A., Desiato F., Fioravanti G., Perconti W., 2010. Seasonal temperatures over Italy and their relationship with low-frequency atmospheric circulation patterns. *Climatic Change*, 99, 211–227

11.2 | Fase B

- Castellari S., Venturini S., Giordano F., Ballarin Denti A., Bigano A., Bindi M., Bosello F., Carrera L., Chiriaco M.V., Danovaro R., Desiato F., Filpa A., Fusani S., Gatto M., Gaudio D., Giovanardi O., Giupponi C., Gualdi S., Guzzetti F., Lapi M., Luise A., Marino G., Mysiak J., Montanari A., Pasella D., Pierantonelli L., Ricchiuti A., Rudari R., Sabbioni C., Sciortino M., Sinisi L., Valentini R., Viaroli P., Vurro M., Zavatarelli M., 2014. Elementi per una Strategia Nazionale di Adattamento ai Cambiamenti Climatici. Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare, Roma.(<http://www.minambiente.it/notizie/strategia-nazionale-di-adattamento-ai-cambiamenti-climatici-0>)
- Gualdi, S., E. Scoccimarro, and A. Navarra, 2008: Changes in tropical cyclone activity due to global warming: Results from a high-resolution coupled general circulation model. *J. Climate*, 21, 5204–5228
- IPCC (2013a) Summary for Policymakers. In: Stocker TF, D. Qin, G.-K. Plattner, et al. (eds) *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge (United Kingdom) and New York (NY, USA), pp 1–30
- Scoccimarro E., S. Gualdi, A. Bellucci, A. Sanna, P.G. Fogli, E. Manzini, M. Vichi, P. Oddo and A. Navarra, 2011: Effects of Tropical Cyclones on Ocean Heat Transport in a High Resolution Coupled General Circulation Model. *Journal of Climate*, 24, 4368–4384.
- SRAC Lombardia- *Strategia Regionale di Adattamento ai Cambiamenti Climatici per la regione Lombardia*: http://www.regione.lombardia.it/wps/wcm/connect/841f23be-02ea-423c-b868-052cc92b6578/Allegato+alla+Comunicazione_Rapporto+di+sintesi_DEF.pdf?MOD=AJPERES&CACHEID=841f23be-02ea-423c-b868-052cc92b6578
- Tomozeiu R., Pasqui M., Quaresima S (2017) Future changes of air temperature over Italian areas: a statistical downscaling technique applied to 2021-2050 and 2071-2100 periods, *Meteorology and Atmospheric Physics* doi.org/10.1007/s00703-017-0536-7

