



Profilo Climatico Locale per la città di Milano

aggiornamento 2025

Direzione di Progetto Resilienza Urbana
Direzione Verde e Ambiente
Comune di Milano



Comune di
Milano



Il Profilo Climatico locale è stato elaborato nell'ambito dell'accordo di collaborazione sottoscritto in data 23 Aprile 2024 tra Comune di Milano - Direzione di Progetto Resilienza Urbana e ARPA Lombardia (rif. deliberazione di Giunta Comunale n. 352 del 28 Marzo 2024).

L'aggiornamento è stato possibile anche grazie al finanziamento del Programma sperimentale di interventi per l'adattamento ai cambiamenti climatici in ambito urbano finanziato dal Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica.

Direzione Resilienza Urbana – Direzione Verde e Ambiente, Comune di Milano

Ilaria Giuliani – Direttrice

Guido Minucci – Project manager

Marco Cigolotti – Climate Data Scientist

Dati e metadati climatici:

ARPA Lombardia

Orietta Cazzuli – Direttore Tecnico Monitoraggio e Prevenzione dei Rischi Naturali

Mauro Mussin - dirigente fisico

Matteo Zanetti – meteorologo e climatologo

INDICE

1	EXECUTIVE SUMMARY	6
2	CLIMA E CAMBIAMENTO CLIMATICO - QUADRO GENERALE	13
2.1	Il contesto globale ed europeo	13
2.2	Le serie storiche di temperatura: il patrimonio di osservazioni di Milano-Brera	13
2.3	Tendenze di lungo periodo in Italia: un riscaldamento progressivo	13
2.4	Eventi estremi e anni record	14
2.5	Tendenze recenti e clima urbano milanese	14
2.6	Variabilità globale ed europea delle precipitazioni	15
2.7	Variabilità delle precipitazioni in Italia: trend di lungo periodo	15
2.8	Caratteristiche stagionali e regionali	15
3	DATI E METODI PER LO STUDIO DELLA VARIABILITÀ CLIMATICA OSSERVATA A MILANO	17
3.1	Data set osservativo	17
3.2	Pericoli climatici	19
3.3	Indicatori climatici	20
4	ANALISI CLIMATICA DELLA TEMPERATURA	22
4.1	Cambiamento della temperatura dell'aria	22
4.2	Gradi giorno di riscaldamento	29
4.3	Gradi giorno di raffrescamento	30
4.4	Giorni freddi	31
5	ANALISI CLIMATICA DELLO STRESS TERMICO	33
5.1	Giornate estive	34
5.2	Notti tropicali	36
5.3	Ondate di calore	38
6	ANALISI CLIMATICA DELLE PRECIPITAZIONI	40
6.1	Precipitazione cumulata: tendenze e cambiamenti	40
6.2	Estremi di precipitazione: frequenza degli eventi estremi e giorni secchi	43
6.3	Siccità e stress idrico	47
7	ALTRI PARAMETRI CLIMATICI	51
7.1	Vento	51
7.2	Grandine	56
7.3	Neve	57
8	CONCLUSIONI SULLA VARIABILITÀ CLIMATICA OSSERVATA	58
8.1	Temperatura	58
8.2	Precipitazioni	59
8.3	Siccità e stress idrico	59
9	PROIEZIONI CLIMATICHE FUTURE - QUADRO GENERALE	61
10	METODOLOGIA	62
10.1	MODELLO DI REGIONALIZZAZIONE	62
11	PROIEZIONI FUTURE DELLA TEMPERATURA	64
11.1	Cambiamento della temperatura dell'aria	64
11.2	Gradi giorno di riscaldamento	67

11.3	Gradi giorno di raffrescamento	68
11.4	Giorni freddi	69
12	PROIEZIONI CLIMATICHE DELLO STRESS TERMICO.....	70
12.1	Giornate estive	70
12.2	Notti tropicali	72
12.3	Ondate di calore.....	73
12.4	Analisi dello stress termico e rischi per la salute	76
13	PROIEZIONI CLIMATICHE DELLE PRECIPITAZIONI	79
13.1	Precipitazione cumulata: tendenze e cambiamenti	79
13.2	Estremi di precipitazione: frequenza degli eventi estremi e giorni secchi	82
13.3	Trend eventi di pioggia intensa	87
13.4	Siccità e stress idrico	89
14	ANDAMENTO INDICATORI.....	94
14.1	Indicatori cambiamento della temperatura	95
14.2	Indicatori stress termico.....	98
14.1	Indicatori precipitazione	103
15	CONCLUSIONI SULLA VARIABILITA' CLIMATICA PREVISTA	106
16	BIBLIOGRAFIA	108
17	APPENDICE 1 – altri grafici	110
18	APPENDICE 2 - raccordo con precedente Profilo Climatico Locale	122

Il Profilo Climatico Locale, una bussola per la Milano di domani

Per governare una città come Milano, con uno sguardo al futuro e la giusta lungimiranza che deve caratterizzare un buon amministratore pubblico, è fondamentale partire dalla scienza.

I dati scientifici, ma anche l'esperienza quotidiana di ciascun cittadino, ci dicono che il clima sta cambiando e che dobbiamo agire, anche a livello locale, per proteggere il nostro futuro.

In questo contesto, il Profilo Climatico Locale di Milano, che fornisce informazioni dettagliate sulle evoluzioni climatiche del nostro territorio, non è un semplice rapporto tecnico, ma una guida pratica con implicazioni importanti in numerosi e a volte inaspettati ambiti della vita quotidiana della nostra comunità.

Rispetto al passato, oggi abbiamo strumenti e dati più precisi, che ci hanno permesso di aggiornare questo importante documento. Grazie alla collaborazione con ricercatori ed esperti (ARPA e Centro Euro Mediterraneo sui Cambiamenti Climatici), abbiamo quindi analizzato gli scenari evolutivi della crisi climatica e degli impatti locali, con l'obiettivo di supportare le trasformazioni di una città sempre più capace di resistere ai fenomeni atmosferici intensi che caratterizzeranno i prossimi decenni.

I fatti parlano chiaro: Milano si sta scaldando velocemente. Entro la fine del secolo vivremo in una città diversa: meno gelo, più notti afose - le cosiddette "notti tropicali", in cui la temperatura non scende mai sotto i 20°C – avranno un impatto sociale da tenere presente in ogni scelta: il caldo eccessivo, i protratti periodi di siccità, implicheranno rischi per la salute dei più fragili e bollette più care per chi deve rinfrescare casa. D'altra parte le piogge intense e le tempeste di vento, sempre più frequenti, ci impongono azioni tese alla messa in sicurezza del territorio.

Il caldo estremo, ad esempio, ha effetti sulle modalità di programmazione, di scelta dei materiali e di gestione delle reti di trasporto, sulla costruzione degli edifici, sulla progettazione dello spazio pubblico. Inoltre, la crisi climatica non colpisce tutti allo stesso modo: chi è più fragile è più esposto. Conoscere i cambiamenti del clima che ci aspettano ci permette di lavorare con consapevolezza affinché nessuno venga lasciato solo davanti alle ondate di calore o alla siccità o alle piogge torrenziali o alle tempeste. La sfida riguarda tutti e ha impatti reali sulla vivibilità, la salute e sui modi di costruire di una città più giusta, equa e a misura d'uomo.

Il Profilo Climatico Locale è quindi una bussola che deve guidare le nostre scelte in una città pensata per un clima che oggi non esiste più e orientare ogni nuovo progetto che dovrà dimostrare di saper resistere alle sfide del futuro.

Ora spetta a noi, amministratori, imprese e cittadini, insieme, trasformare questi dati e queste conoscenze sempre più approfondite in azioni concrete per una Milano più vivibile e resiliente.

Assessora all'Ambiente e Verde

Elena Grandi

1 EXECUTIVE SUMMARY

Il Profilo Climatico Locale della città di Milano è lo strumento con cui l'Amministrazione comunale mette a disposizione un quadro organico e scientifico dell'evoluzione del clima urbano. Costituisce, prima di tutto, una base conoscitiva che descrive come il clima di Milano è cambiato nel passato e potrà cambiare nel presente e nel futuro, con particolare attenzione all'incremento delle temperature e alle precipitazioni in quanto fenomeni che incidono direttamente sulla vita delle persone, sui servizi e sulle infrastrutture. Gli indicatori presentati in questo aggiornamento aiutano a comprendere i principali pericoli associati al cambiamento climatico e a delineare la futura pericolosità climatica della città.

La prima edizione del Profilo Climatico Locale, elaborata nel 2018 con ARPA Lombardia e con ARPA Emilia-Romagna, ha analizzato la variabilità climatica del periodo 1961–2017 e fornito proiezioni per il periodo 2020–2050, costituendo il primo riferimento strutturato a supporto delle politiche locali in materia di qualità dell'aria, energia, adattamento e resilienza climatica.

Il documento a cui questa sintesi fa riferimento, rappresenta l'aggiornamento di quel primo Profilo Climatico Locale. È elaborato dal Comune di Milano, attraverso la Direzione Verde e Ambiente e, in particolare, la **Direzione di Progetto di Resilienza Urbana, con il supporto tecnico-scientifico di ARPA Lombardia**, che contribuisce a garantire la qualità dei dati, la coerenza metodologica con il sistema regionale e l'allineamento con i più recenti sviluppi della climatologia.

In questo quadro, dunque, il Profilo Climatico Locale **fornisce indicazioni sulla futura pericolosità climatica, sia in relazione alle temperature sia alle precipitazioni, e si propone come base conoscitiva a supporto delle principali politiche urbane.** Contribuisce alla definizione e al monitoraggio del **Piano Aria Clima**, documento cardine per la riduzione dell'inquinamento atmosferico, la mitigazione delle emissioni climalteranti e il rafforzamento della capacità di adattamento urbano, e può offrire un riferimento climatico per il **Piano di Governo del Territorio** e per gli altri strumenti di pianificazione territoriale e di settore – in ambiti quali mobilità, spazi verdi, infrastrutture e servizi essenziali. Le informazioni prodotte risultano, inoltre, utili per orientare le strategie e i **piani di protezione civile**, in particolare per quanto riguarda le ondate di calore, i periodi siccitosi e gli eventi di precipitazione intensa, e per accompagnare la progettazione di opere pubbliche e private, nuove urbanizzazioni, infrastrutture critiche e interventi di rigenerazione urbana, sempre più spesso chiamati a dimostrare la propria resilienza climatica lungo l'intero ciclo di vita.

Il nuovo Profilo Climatico Locale si configura, in questo senso, come **quadro di riferimento condiviso per i soggetti che devono progettare e realizzare interventi sul territorio comunale**, offrendo indicazioni climatiche univoche, coerenti e facilmente comunicabili. Questo riferimento comune risulta particolarmente utile anche alla luce delle più recenti richieste in ambito di appalti pubblici, che rendono sempre più frequente la necessità di una **“verifica climatica” delle opere e degli interventi**. Proprio perché i cambiamenti climatici attesi non riguardano soltanto temperature e piogge, ma investono l'intero sistema urbano – salute pubblica, servizi alla persona, rete dei trasporti, qualità dell'abitare, funzionamento delle infrastrutture e dei servizi essenziali, povertà energetica e coesione sociale – **comprendere come evolvono gli indicatori climatici significa anticipare le pressioni che la città dovrà affrontare nei prossimi decenni e motivare la necessità di interventi strutturali di adattamento, riduzione della vulnerabilità e trasformazione degli spazi urbani in chiave più resiliente e inclusiva.**

Rispetto alla versione precedente, **il nuovo Profilo Climatico Locale introduce alcune importanti innovazioni metodologiche e ne evidenzia le implicazioni.** Il presente studio analizza in modo congiunto l'evoluzione storica e quella futura della temperatura e delle precipitazioni fino al 2100, **utilizzando i dati più aggiornati disponibili in letteratura scientifica e facendo riferimento ai più recenti scenari climatici coerenti con il quadro IPCC.**

Per la descrizione del clima futuro vengono adottati, per la prima volta nel Profilo Climatico Locale della città di Milano, gli scenari socio-economici condivisi (Shared Socio-economic Pathways, SSP), nuovo riferimento dell'IPCC, che descrivono possibili futuri della società, dell'economia, della tecnologia e della demografia oltre che delle emissioni climalteranti. In questa prospettiva **si è scelto di adottare un unico scenario di riferimento, l'SSP3-7.0, caratterizzato da un livello di riscaldamento medio-alto entro fine secolo e sempre più utilizzato per valutare rischi e impatti in condizioni di assenza di forti politiche di mitigazione: uno scenario prudenziale, che consente di stimare in modo cautelativo le possibili pressioni future sul sistema urbano e di orientare le scelte di adattamento.**

Le elaborazioni si basano sulla versione più aggiornata e più dettagliata oggi disponibile, rilasciata dal Centro Euro-Mediterraneo sui Cambiamenti Climatici (CMCC) nel febbraio 2025, e su un ensemble di simulazioni che permette di ridurre l'incertezza associata ai singoli modelli e di ottenere proiezioni più stabili e robuste, particolarmente utili per la programmazione di interventi e infrastrutture con orizzonti di vita lunghi. Lo scenario presentato in questo documento rappresenta una delle possibili evoluzioni coerenti con quanto previsto dall'IPCC: molto può ancora essere fatto, tanto a livello globale quanto a scala locale, per influenzare l'andamento effettivo del clima. Gli impatti che si manifesteranno a Milano dipenderanno infatti non solo dalle dinamiche climatiche, ma anche dalle scelte del settore pubblico e privato e dai comportamenti quotidiani delle cittadine e dei cittadini, dei city users e dei turisti che ogni giorno abitano, vivono e utilizzano la città.

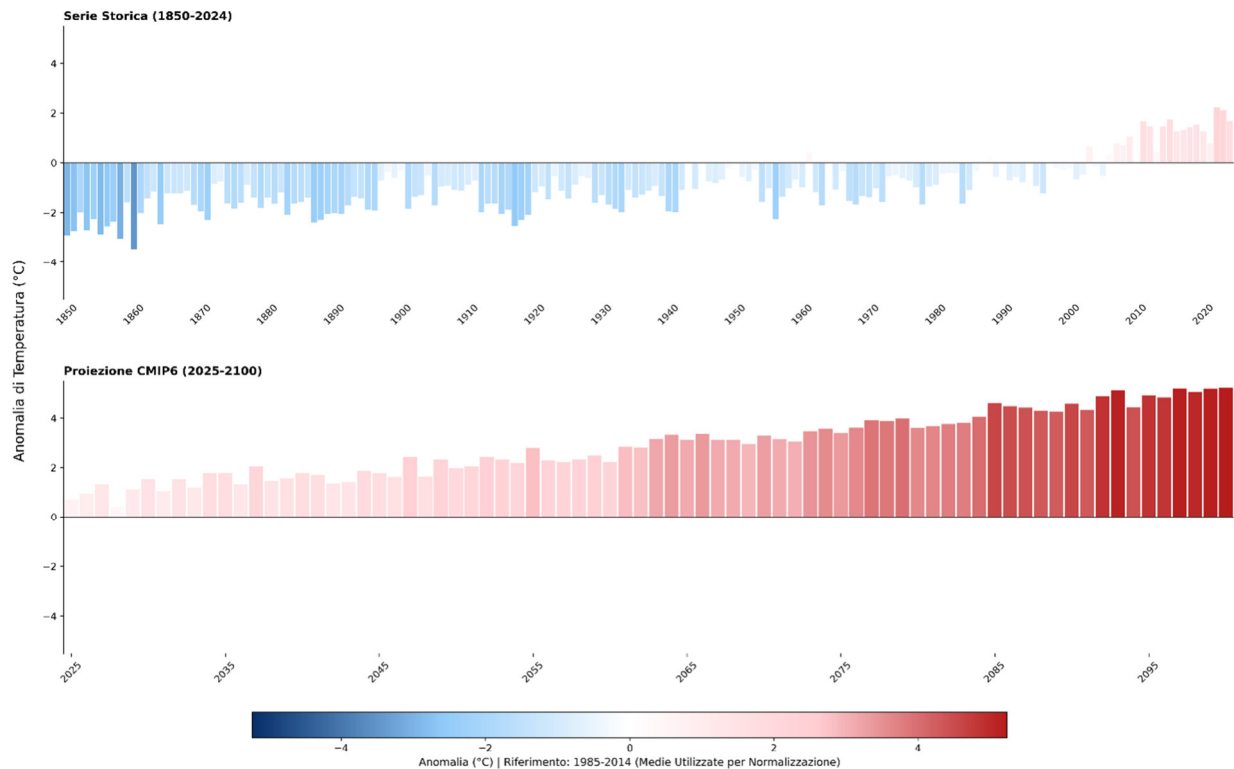
Le sezioni che seguono approfondiscono questi aspetti descrivendo, da un lato, l'andamento osservato delle temperature e delle precipitazioni a Milano negli ultimi decenni e, dall'altro, gli scenari futuri fino al 2100 nello scenario di riferimento adottato.

Per offrire fin da subito una rappresentazione intuitiva di questo percorso, **il grafico seguente mette a confronto l'andamento della temperatura media annua registrata a Milano:** poiché sono disponibili i dati della stazione "storica" di Milano Brera, abbiamo la possibilità di analizzare l'evolversi delle temperature dal cosiddetto periodo pre-industriale sino ad oggi.

La parte superiore mostra il progressivo aumento delle temperature osservate, con un'accelerazione evidente negli ultimi decenni; la parte inferiore illustra l'ulteriore incremento atteso nei prossimi anni, fino a fine secolo.

L'analisi conferma che, nel quadro più ampio del Mediterraneo, Milano si colloca in una regione che la letteratura scientifica identifica come "hotspot climatico": un'area in cui il riscaldamento avviene più rapidamente rispetto alla media globale e dove caldo estremo, siccità e precipitazioni intense tendono a intensificarsi. Un aumento medio globale di +1,5/+2 °C può tradursi localmente in incrementi anche superiori a +5/+6 °C rispetto ai valori di riferimento.

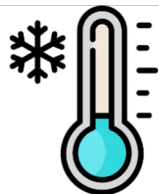
Insieme, queste informazioni permettono di cogliere a colpo d'occhio la direzione del cambiamento climatico sulla città e di comprendere perché sia necessario integrare stabilmente il fattore clima nelle politiche, nei piani e nei progetti urbani.



Di seguito si riporta **una sintesi delle principali evidenze emerse dall'analisi storica e dagli scenari futuri, organizzate per indicatori climatici (temperature estreme, notti tropicali, bilancio idrico, precipitazioni).**

La tabella mette a confronto l'andamento osservato e le proiezioni attese e propone, per ciascun indicatore, una prima lettura delle possibili implicazioni per la città, in termini di salute, servizi essenziali, infrastrutture, gestione dell'acqua e pianificazione urbana.

Giorni di gelo e giorni di ghiaccio



Periodo storico

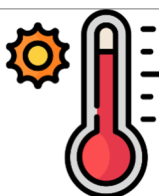
Dal 1971 ad oggi i giorni di gelo (in cui la temperatura minima scende sotto gli 0 °C) sono diminuiti sensibilmente, attestandosi su meno di 10 giorni anno negli ultimi anni.

I giorni di ghiaccio (ovvero i giorni in cui anche la temperatura massima è inferiore a 0 °C) sono invece sostanzialmente spariti.

Proiezioni future

In futuro i giorni di ghiaccio sono destinati a scomparire, ma anche i giorni di gelo verso il 2050 si attesteranno a circa 5 giorni l'anno, per poi scomparire anch'essi a fine secolo. Questo comporterà inverni sempre più miti, con una diminuzione dei disagi legati a neve e ghiaccio per la mobilità e la sicurezza stradale, ma anche una minore capacità del clima invernale di limitare alcuni parassiti e patogeni, con possibili effetti sulla salute, sul verde urbano e sulle colture.

Giorni caldi



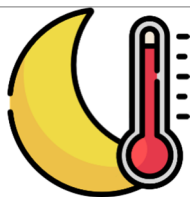
Periodo storico

I giorni caldi (in cui la temperatura massima supera i 25 °C) sono in aumento. In particolare si segnala un marcato incremento dei giorni con temperatura massima superiore a 30 °C.

Proiezioni future

Rispetto al periodo 1985-2014, i giorni caldi aumenteranno entro fine secolo del 50%. Aumenteranno in modo ancora più marcato invece i giorni con temperatura massima superiore a 35 °C, che passeranno da pochi giorni nel periodo di riferimento a più di un mese a fine secolo, con implicazioni rilevanti per lo stress termico urbano, la salute e i consumi energetici, in particolare per il raffrescamento degli edifici e il funzionamento delle reti elettriche nei periodi di picco della domanda.

Notti tropicali



Periodo storico

I giorni in cui la temperatura minima non scende sotto i 20 °C sono raddoppiati tra il periodo 1971-2000 e il 2001-2025, con un aumento significativo anche dei giorni in cui la temperatura non scende sotto i 25 °C. Una notte meno fresca significa una notte con maggiore stress termico urbano e minore possibilità di recupero fisiologico, soprattutto per le persone più vulnerabili.

Proiezioni future

I giorni in cui la temperatura minima non scende sotto i 20 °C raddoppieranno nel 2050 e triplicheranno nel 2100 rispetto alla media del periodo 1985-2014.

L'aumento delle notti calde rappresenterà uno dei segnali più forti del cambiamento climatico a Milano e potrà amplificare lo stress termico notturno, il fabbisogno di raffrescamento degli edifici e le condizioni di disagio soprattutto per le persone più vulnerabili

Bilancio idrico



Periodo storico

Il bilancio idrico mostra un'ampia variabilità interannuale.

Non si evidenziano, ad oggi, variazioni statisticamente robuste nella cumulata complessiva.

Proiezioni future

È atteso un peggioramento del bilancio idrico estivo, con periodi siccitosi più lunghi e una maggiore domanda evaporativa.

Vi è una tendenza rilevante ad un rischio crescente di stress idrico nei mesi più caldi, con potenziali impatti sulla disponibilità di risorsa idrica, sugli ecosistemi e sui servizi che dipendono dall'acqua, come l'approvvigionamento idropotabile, l'irrigazione del verde urbano e delle aree agricole, e il mantenimento del comfort termico negli spazi aperti.

Precipitazioni



Periodo storico

Nell'analisi dei dati storici la pioggia totale annua non mostra variazioni statisticamente significative.

Alcune analisi suggeriscono un possibile aumento della frequenza di eventi brevi ma intensi, pur con incertezza.

Proiezioni future

Il totale di precipitazioni cumulate annue non segnala particolari variazioni, tuttavia è prevista una diminuzione delle piogge durante la stagione estiva.

Dai modelli non si evidenziano trend statisticamente significativi con riferimento alle piogge intense, ma la combinazione tra temperature più elevate, periodi siccitosi più frequenti ed eventuali episodi di pioggia intensa potrà accentuare la pressione sui sistemi di drenaggio urbano e sulla gestione del rischio di allagamento con ripercussioni sulla viabilità, sul trasporto pubblico locale, sui costi di manutenzione e sugli interventi di protezione civile, nonché sulla continuità dei servizi erogati dalle infrastrutture critiche (cabine elettriche, reti digitali, impianti tecnologici).

**Studio della variabilità climatica
osservata sul periodo 1971-2025**

2 CLIMA E CAMBIAMENTO CLIMATICO - QUADRO GENERALE

2.1 Il contesto globale ed europeo

A scala globale, il Sesto Rapporto di Valutazione dell'IPCC (xiv) conferma e rafforza le evidenze scientifiche sul riscaldamento medio del sistema climatico terrestre. I dati rilevati evidenziano un incremento della temperatura media superficiale globale stimata tra 0,95 e 1,20 °C (con un valore centrale di 1,09 °C) nel decennio 2011-2020 rispetto al periodo 1850-1900, pur in presenza di fluttuazioni su base annua e decennale. A livello europeo, gli eventi estremi relativi alle temperature elevate hanno mostrato un chiaro incremento di frequenza nell'ultimo secolo, mentre è diminuita la frequenza di eventi estremi relativi alle basse temperature.

Questo quadro globale ed europeo fornisce il contesto necessario per comprendere le dinamiche climatiche osservate a scala locale, dove spesso il segnale di cambiamento può risultare diverso rispetto alla scala globale. Una conoscenza approfondita a scala locale è infatti necessaria per determinare i principali rischi climatici, soprattutto quando si definiscono i piani di governo del territorio e di adattamento a livello di città.

2.2 Le serie storiche di temperatura: il patrimonio di osservazioni di Milano-Brera

Milano dispone di una delle più lunghe e preziose serie storiche di dati meteorologici a livello mondiale. Le osservazioni meteorologiche giornaliere presso l'Osservatorio Astronomico di Brera sono iniziate nel 1763 e proseguono ininterrottamente fino ad oggi (xvi, xvii). Questa straordinaria continuità temporale di oltre 260 anni rappresenta un patrimonio scientifico di valore inestimabile per lo studio delle variazioni climatiche a lungo termine.

Le serie di Milano-Brera hanno richiesto un accurato lavoro di omogeneizzazione per tenere conto dei numerosi cambiamenti che si sono verificati nel corso dei secoli: modifiche agli strumenti di misura, trasferimenti della stazione, variazioni nelle metodologie di osservazione e nella collocazione urbana dell'osservatorio (xii, xiii). In particolare, la riorganizzazione delle osservazioni operata da Francesco Carlini nel 1835 ha rappresentato uno spartiacque significativo nella storia delle misurazioni milanesi (xii).

L'analisi di queste serie storiche omogeneizzate ha permesso di ricostruire con precisione l'evoluzione termica dell'area milanese e più in generale del Nord Italia negli ultimi due secoli (iv, xvii), fornendo un contesto temporale essenziale per comprendere le dinamiche climatiche attuali.

2.3 Tendenze di lungo periodo in Italia: un riscaldamento progressivo

L'analisi delle serie storiche italiane omogeneizzate mostra chiaramente un trend di aumento della temperatura di circa 1 °C per secolo negli ultimi due secoli (iv). L'analisi delle serie storiche di temperature annue sull'Italia ha evidenziato una tendenza positiva nel lungo periodo 1880-2011 pari a 0.1 °C/decennio (iv). Questo segnale diventa significativamente più intenso negli ultimi decenni, con un trend di 0.5 °C/decennio per il periodo 1981-2005, evidenziando un'accelerazione del riscaldamento in tempi recenti.

Questo riscaldamento di lungo periodo non è stato tuttavia uniforme né nel tempo né nello spazio, mostrando significative differenze regionali e stagionali. Per quanto riguarda l'Italia

settentrionale, dove si colloca Milano, le tendenze mostrano caratteristiche peculiari. L'analisi delle temperature stagionali per il periodo 1961-2006 evidenzia che le serie invernali nel Nord Italia presentano un trend di riscaldamento statisticamente significativo a partire dal 1961, mentre per il resto del Paese la stagione invernale mostra sostanziale stazionarietà (xxvi).

A livello stagionale, la primavera presenta un trend positivo generalizzato su tutto il territorio nazionale per l'intero periodo considerato (xxvi). Particolarmente interessante risulta l'andamento delle temperature estive, che mostrano un trend negativo fino al 1981, seguito da un marcato trend positivo negli anni successivi, con un aumento maggiore durante la stagione estiva rispetto alle altre stagioni (xxvi). Le temperature autunnali, invece, evidenziano un riscaldamento a partire dal 1970 (xxvi). Queste differenze stagionali sottolineano la complessità dei pattern di riscaldamento climatico a scala regionale.

2.4 Eventi estremi e anni record

Gli anni più recenti hanno registrato anomalie termiche senza precedenti. L'anno più caldo è stato il **2022** con un'anomalia di **+2.86 °C** rispetto alla media 1971-2000, seguito dal **2023** (+2.76 °C), **2025** (+2.48 °C), **2015** (+2.38 °C) e **2024** (+2.32 °C). Negli ultimi 10 anni (2016-2025), **tutti gli anni** hanno registrato anomalie superiori a +1.4 °C, con 9 anni su 10 che superano +1.9 °C, evidenziando un'accelerazione marcata del riscaldamento. Di particolare rilevanza il fatto che **gli ultimi 4 anni sono tra i primi 5 anni più caldi del periodo**.

Gli estremi di temperatura sulla Penisola Italiana hanno mostrato nelle ultime decadi un aumento significativo del numero di eventi sopra-soglia e una diminuzione del numero di eventi sottosoglia, più pronunciato per le temperature massime che per le minime (vi). L'analisi degli estremi di temperatura per il periodo 1961-2011 mostra una tendenza generale al riscaldamento con trend significativi per i giorni estivi, le notti tropicali, le ondate di calore e gli indici basati sui percentili nella maggior parte delle stazioni italiane. I trend di riscaldamento risultano più pronunciati in estate e primavera, mentre sono più deboli in inverno e autunno (xi).

2.5 Tendenze recenti e clima urbano milanese

Le analisi più recenti confermano e rafforzano il quadro di riscaldamento progressivo. Lo studio delle temperature minime e massime giornaliere in Italia per il periodo 1865-1996 ha evidenziato tendenze annuali e stagionali significative, con un aumento generalizzato delle temperature e una riduzione del range termico giornaliero (DTR) dovuta a un incremento più marcato delle temperature minime rispetto alle massime (iv).

Per l'area milanese, l'effetto crescente dell'isola di calore urbano ha rappresentato un fattore aggiuntivo per l'innalzamento delle temperature locali. Gli studi condotti sulle serie di Milano hanno permesso di quantificare e separare il contributo dell'urbanizzazione dal segnale del cambiamento climatico globale (xvii), evidenziando come l'espansione urbana abbia amplificato localmente gli effetti del cambiamento climatico.

I dati più recenti (1991-2020) confermano l'intensificazione degli eventi di caldo intenso in Italia, con un aumento significativo della frequenza, durata e intensità delle ondate di calore, particolarmente evidenti nelle aree urbane del Nord Italia (x). Questi trend sono coerenti con le proiezioni globali sul riscaldamento climatico e con le evidenze fornite dall'IPCC nel suo sesto rapporto di valutazione (xiv).

2.6 Variabilità globale ed europea delle precipitazioni

A scala globale ed europea, il segnale delle precipitazioni è più variegato rispetto a quello delle temperature. Dal 1951 ad oggi si sono osservati incrementi nell'Europa del Nord e diminuzioni nell'area del Mediterraneo. Numerosi studi hanno mostrato come a livello europeo negli ultimi anni la frequenza di fenomeni intensi, anche siccitosi, sia aumentata, configurando uno scenario di crescente variabilità idro-climatica.

Un quadro climatico completo implica l'analisi della variabilità temporale e spaziale sia dei valori medi che degli estremi. Gli eventi estremi sono definiti attraverso soglie statistiche (ad esempio percentili, minimi, massimi) e negli ultimi anni la loro frequenza sembra essere aumentata, con conseguenze spesso importanti, a volte anche drammatiche per la società e gli ecosistemi naturali.

2.7 Variabilità delle precipitazioni in Italia: trend di lungo periodo

A differenza delle temperature, che mostrano trend chiari e univoci di aumento, le precipitazioni presentano un quadro più complesso e variabile nello spazio e nel tempo. L'analisi delle serie storiche italiane di precipitazione per gli ultimi due secoli evidenzia una leggera tendenza negativa sul periodo 1800-2011 pari a -0.58 ± 0.15 %/decennio, più intensa nel Nord Italia (-0.71 ± 0.19 %/decennio) che nel Sud Italia (iv). Tuttavia, emergono segnali significativi a scala regionale e stagionale che richiedono un'analisi più dettagliata.

Per l'Italia centro-settentrionale, dove si inserisce l'area milanese, sono state documentate tendenze alla riduzione delle precipitazioni in alcune aree durante il secolo scorso, con diminuzioni fino al 20% in determinate località (iv). L'anno 2017 è stato particolarmente emblematico, risultando l'anno più secco in Italia dal 1800 ad oggi, con piogge oltre il 30% inferiori alla media del periodo di riferimento 1971-2000.

Lo studio ad alta risoluzione delle precipitazioni per l'Italia centro-settentrionale nel periodo 1961-2015 ha fornito un quadro dettagliato della variabilità spazio-temporale delle precipitazioni (xix). L'analisi delle tendenze su un dataset (ArCIS¹) con risoluzione di 5x5 km ha 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 (xiv). Questo pattern complesso sottolinea l'importanza dell'orografia e delle circolazioni locali nella distribuzione delle precipitazioni.

Il recupero di dati storici attraverso il progetto Cli-DaRe@School ha inoltre ampliato la disponibilità di serie di precipitazione per il periodo 1921-1950, permettendo una migliore caratterizzazione della variabilità a lungo termine (iii). Questo nuovo dataset ha evidenziato l'importanza del recupero di dati storici per comprendere i cicli climatici naturali e distinguerli dalle tendenze antropogeniche.

2.8 Caratteristiche stagionali e regionali

Le stagioni più colpite dai cambiamenti nel regime 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 (xix). 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 (xix).

¹ <https://www.arcis.it/wp/>

Per la regione Lombardia, l'analisi delle lunghe serie giornaliere di precipitazione ha rivelato tendenze significative che influenzano il controllo delle acque meteoriche urbane (xvii). Lo studio ha evidenziato una diminuzione delle precipitazioni totali annuali accompagnata da un aumento dell'intensità degli eventi di pioggia breve ma intensa, configurando uno scenario critico per la gestione delle infrastrutture di drenaggio urbano nelle aree metropolitane lombarde (xxiv).

Particolare attenzione è stata dedicata allo studio delle precipitazioni estive nella regione Emilia-Romagna, confinante con la Lombardia. L'analisi delle serie 1922-1995 ha rivelato un aumento significativo delle precipitazioni estive, con un punto di svolta sistematico intorno al 1962. Questo incremento è risultato più marcato nelle parti nord-occidentale, centrale e nord-orientale della regione, evidenziando una forte componente spaziale nel segnale climatico (xxv).

La revisione completa degli studi sulle tendenze osservate delle precipitazioni in Italia ha fornito un quadro d'insieme della letteratura scientifica sull'argomento (v). Questa sintesi ha evidenziato come i trend delle precipitazioni in Italia mostrino una forte variabilità regionale, con differenze significative tra Nord e Sud, tra zone costiere e interne, e tra diverse stagioni. L'analisi di tendenza, intensità e frequenza delle precipitazioni dipende molto dalla finestra temporale e dalle zone analizzate.

3 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. Tuttavia, l'incremento non è stato graduale lungo tutto il periodo considerato: ad una sostanziale stazionarietà per oltre un secolo, è seguito un brusco rialzo a partire dagli anni '80, ulteriormente accentuatosi negli anni '2000. Per quanto riguarda invece l'andamento a lungo termine delle precipitazioni cumulate, dal 1850 ad oggi, si è registrato un leggero calo nella quantità totale annua (dell'ordine del - 5% ogni cento anni), più marcato durante gli ultimi decenni².

La regione, così come sottolinea la strategia, a causa delle caratteristiche orografiche, territoriali e socioeconomiche 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 1971-2025.

3.1 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 serie climatica della stazione di Brera è una serie storica centenaria con misure meteorologiche di temperatura dal 1763 e di precipitazione cumulata dal 1764; la stazione lungo il percorso ha registrato anche degli spostamenti. Gli spostamenti, le modifiche dell'ambiente circostante (palazzi, alberi), la sua collocazione (nello specifico caso dal tetto dell'Osservatorio all'orto botanico nei primi anni '60, dopo pochi anni nuovamente sul tetto) sono alcuni 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 (informazioni) della stazione di Brera così come sono presentati dal lavoro di Maugeri et al. (2002a e 2002b).

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 dataset nazionale SCIA. I dati erano stati utilizzati nell'ambito della precedente elaborazione del Profilo Climatico locale per un confronto dei dati di contesto urbano con un contesto più periferico. In questo studio sono invece stati utilizzati i dati gestiti da ARPA Lombardia, provenienti dalla stazione di **Milano Lambrate**, che presenta dati di temperatura e precipitazione dal 2001, per considerazioni riguardanti le condizioni nei due contesti.

² [http://www.regione.lombardia.it/wps/wcm/connect/841f23be-02ea-423c-b868-](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-b868052cc92b6578)

[052cc92b6578/Allegato+alla+Comunicazione_Rapporto+di+sintesi_DEF.pdf?MOD=AJPERES&CACHEID=841f23be-02ea-423c-b868052cc92b6578](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-b868052cc92b6578)

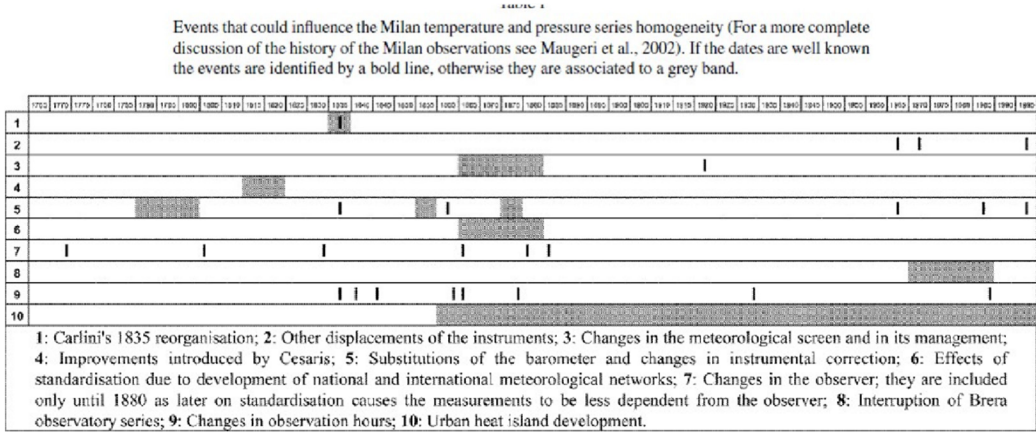


Figura 1: Metadati stazione di Brera (Maugeri et al., 2002)

3.2 Pericoli climatici

L'approfondimento del profilo climatico è stato effettuato anche con riguardo alle nuove esigenze di poter comprendere i pericoli climatici nell'ottica di effettuare gli studi di "verifica climatica" riguardanti opere o infrastrutture.

Uno dei concetti principali degli Eurocodici, le norme europee per la progettazione nel settore delle costruzioni, è la vita nominale di progetto, definita come il periodo durante il quale la struttura potrà essere utilizzata senza che venga sottoposta a riparazioni di rilievo, ma solo a interventi di manutenzione ordinaria.

La vita nominale di progetto degli edifici e delle altre strutture comuni progettate utilizzando gli Eurocodici è di 50 anni, mentre per gli edifici e i ponti monumentali è stimata a 100 anni. Ne consegue che le strutture progettate nel 2020 resisteranno alle azioni climatiche (ad esempio neve, vento, temperature) e ai mutamenti del clima, compresi gli eventi estremi, previsti fino al 2070 (nel caso degli edifici) e fino al 2120 nel caso di ponti e edifici monumentali.

In questo senso i Regolamenti europei prima ed il Codice degli Appalti poi hanno introdotto la necessità di effettuare una valutazione del rischio climatico e della vulnerabilità degli interventi. In questo contesto si può, in generale, fare riferimento alla classificazione dei pericoli proposta nell'Appendice A dell'Allegato I del Regolamento Delegato (UE) 2021/2139.

Di seguito si riporta la citata classificazione, evidenziando i pericoli legati al clima che sono stati indagati nel presente studio in quanto considerati più rilevanti per il contesto del Comune di Milano.

	Temperatura	Venti	Acque	Massa solida
Cronici	Cambiamento della temperatura (aria, acque dolci, acque marine)	Cambiamento del regime dei venti	Cambiamento del regime e del tipo di precipitazioni (pioggia, grandine, neve/ghiaccio)	Erosione costiera
	Stress termico		Variabilità idrologica o delle precipitazioni	Degradazione del suolo
	Variabilità della temperatura		Acidificazione degli oceani	Erosione del suolo
	Scongelamento del permafrost		Intrusione salina	Soliflusso
			Innalzamento del livello del mare	
Acuti	Ondata di calore	Ciclone, uragano, tifone	Siccità	Valanga
	Ondata di freddo/gelata	Tempesta (comprese quelle di neve, polvere o sabbia)	Forti precipitazioni (pioggia, grandine, neve/ghiaccio)	Frana
	Incendio di incolto	Tromba d'aria	Inondazione (costiera,	Subsidenza

	Temperatura	Venti	Acque	Massa solida
			fluviale, pluviale, di falda)	
			Collasso di laghi glaciali	

3.3 Indicatori climatici

In relazione ai pericoli climatici sopra esposti, si sono individuati indicatori che potessero essere di ausilio nella lettura dello stato di fatto e nella definizione delle proiezioni future.

Gli indicatori sono stati ricavati dalla letteratura tematica³, andando a selezionare indicatori consolidati o di nuova concezione al fine di poter meglio caratterizzare il fenomeno studiato.

Partendo dai dati giornalieri o – dove disponibili – dai dati suborari (rilevati ogni 10 minuti) sono stati calcolati diversi indicatori stagionali e annuali selezionati nell'ambito del lavoro, per descrivere la variabilità climatica locale:

TEMPERATURA

- temperatura media giornaliera dell'aria vicino al suolo (Tas)
- gradi giorni di riscaldamento (HDDs -GG), definiti come somma di 20 °C meno la temperatura media giornaliera, se la temperatura media giornaliera è minore di 15 °C.
- gradi giorni di raffrescamento (CDDs - GG) definiti come somma della temperatura media giornaliera meno 21 °C, se la temperatura media giornaliera è maggiore di 24 °C.
- numero di giorni con gelo, definito come il numero di giorni in cui la temperatura minima è inferiore a 0 °C (Fd - giorni)
- numero di giorni con ghiaccio, definito come numero di giorni in cui la temperatura minima e massima sono inferiori a 0 °C (Txice - giorni)

STRESS TERMICO

- notti tropicali (TN - giorni), definite come i numeri di giorni con la temperatura minima maggiore di 20 °C;
- numero di giorni estivi (SD - giorni), media annuale del numero di giorni con temperatura massima maggiore di 25 °C o 30 °C

ONDATE DI CALORE

- Indice di durata dei periodi di caldo (WSDI - giorni), definito come numero totale di giorni in cui la temperatura massima giornaliera è superiore al 90° percentile della temperatura massima giornaliera del periodo climatologico di riferimento per almeno 6 giorni consecutivi.

PRECIPITAZIONI

- precipitazione cumulata per i giorni con precipitazione maggiore o uguale a 1 mm (PRCPTOT - mm)
- giorni di precipitazione intense, definito come numero di giorni con precipitazione giornaliera superiore ai 20 mm (R20 - giorni)
- massimi giornalieri di precipitazione nell'anno (RX1day - mm)

³ Si veda ad esempio https://etccdi.pacificclimate.org/list_27_indices.shtml

SICCITA' e STRESS IDRICO

- numero massimo di giorni consecutivi senza pioggia (pxCDD);
- indice standardizzato di precipitazione per periodi di 3 e 6 mesi (SPI3e SPI6), calcolato come classificazione in classi (da molto piovoso a estremamente asciutto) nell'indice SPI calcolato per un periodo di accumulo di 3 e 6 mesi.
- indicatore climatico che misura lo stato di bilancio idrico (SPEI), considerando sia la quantità di precipitazioni che l'evapotraspirazione

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 quindi analizzate tendenze, intensità e frequenze dal 1971 al 2025.

4 ANALISI CLIMATICA DELLA TEMPERATURA

In generale le analisi riguardanti la temperatura sono state svolte principalmente rispetto alla stazione di Milano Brera, significativa sia per la serie storica disponibile sia perché comunque caratterizzante la situazione in Milano, seppure possano esserci differenze dovute a fattori microclimatici che portano a differenze tra le varie zone.

Nel presente studio, tuttavia, il focus è stato principalmente sui trend; pertanto, il confronto con altre stazioni è stato utilizzato per evidenziare eventuali ulteriori informazioni che potessero fornire informazioni aggiuntive.

4.1 Cambiamento della temperatura dell'aria

Lo studio dell'andamento temporale della temperatura media è stato condotto con riferimento ai dati della stazione di Brera, che ha dati disponibili dal 1763 e permette quindi una visione d'insieme anche con riferimento al periodo preindustriale (convenzionalmente definito come 1850-1900).

L'andamento mostra una tendenza all'aumento, significativa dal punto di vista statistico (test Kendall) (Figura 2).

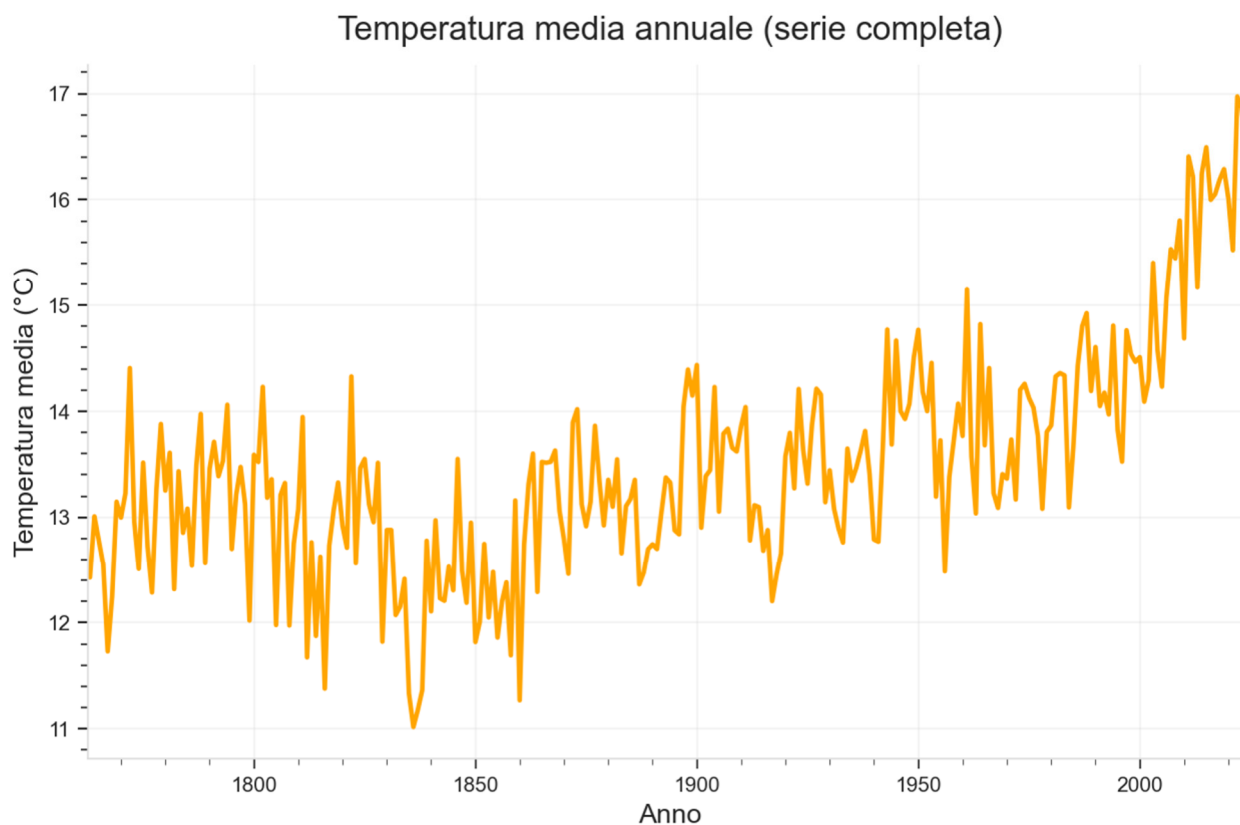


Figura 2: Andamento della temperatura media annuale (1763-2025 - Milano Brera)

In generale, la tendenza all'aumento si sta accentuando negli ultimi anni, come mostrato nel grafico seguente, con un valore di circa di circa 0,15 °C/decennio nel periodo 1951-2000, è quasi quadruplicato, pari a circa 0,59 °C/decennio, per il periodo più recente 1975-2025 (Figura 3).

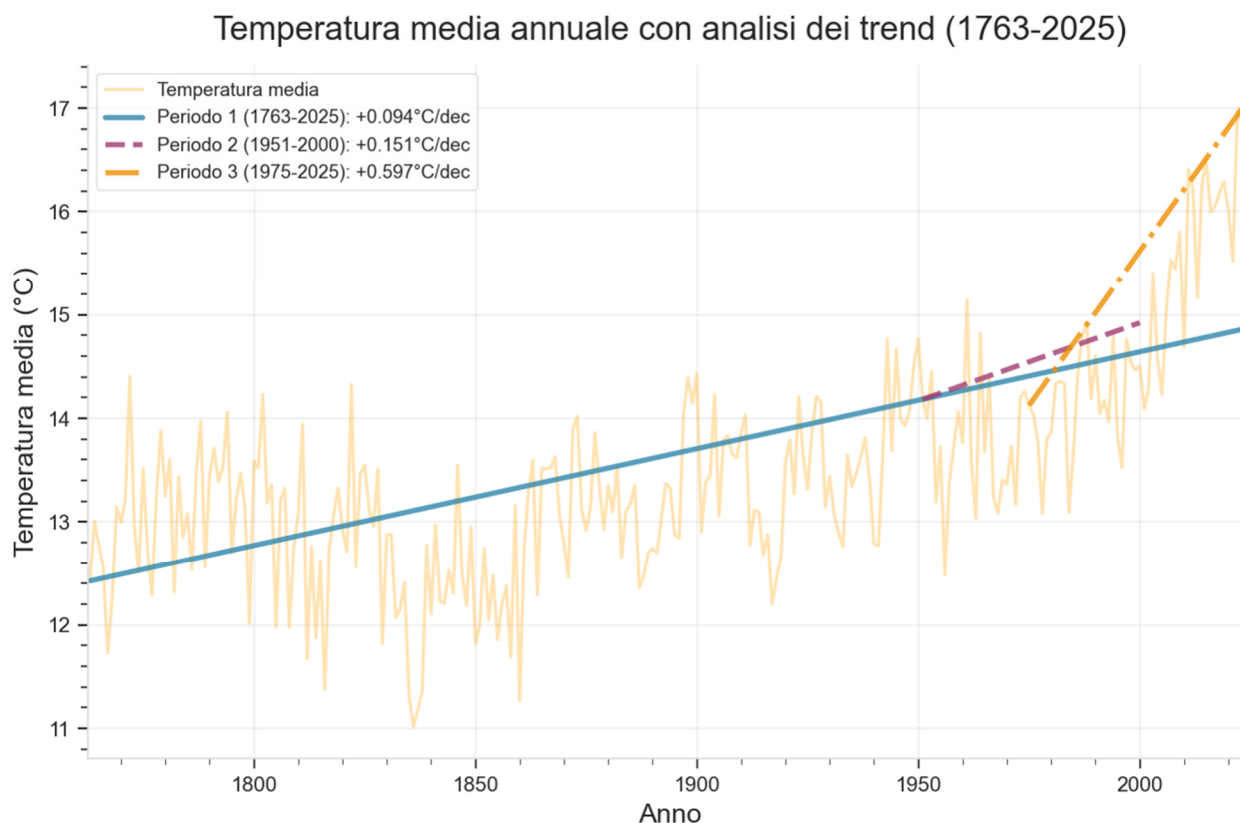


Figura 3: Andamento della temperatura media annuale – trend (Milano Brera)

Il grafico (Figura 4) mostra infine l'andamento della temperatura media annuale nel corso di oltre un secolo, insieme alla media mobile trentennale, che consente di evidenziare la tendenza di lungo periodo smussando la variabilità interannuale.

Dall'osservazione si nota che:

- Fino alla metà del XX secolo le temperature oscillano intorno a valori relativamente stabili, con variazioni annuali anche marcate ma senza un trend evidente.
- A partire dagli anni '80 si registra invece un aumento netto e progressivo della temperatura media, che diventa più marcato negli ultimi decenni.
- La media mobile trentennale evidenzia chiaramente questo trend: dopo una lunga fase di relativa stabilità, la curva inizia a crescere rapidamente, soprattutto dopo il 1990, raggiungendo nel periodo recente i valori più elevati dell'intera serie.

In sintesi, è evidente un aumento considerevole e veloce della temperatura media negli ultimi decenni, coerente con il riscaldamento climatico globale osservato anche a scala locale.

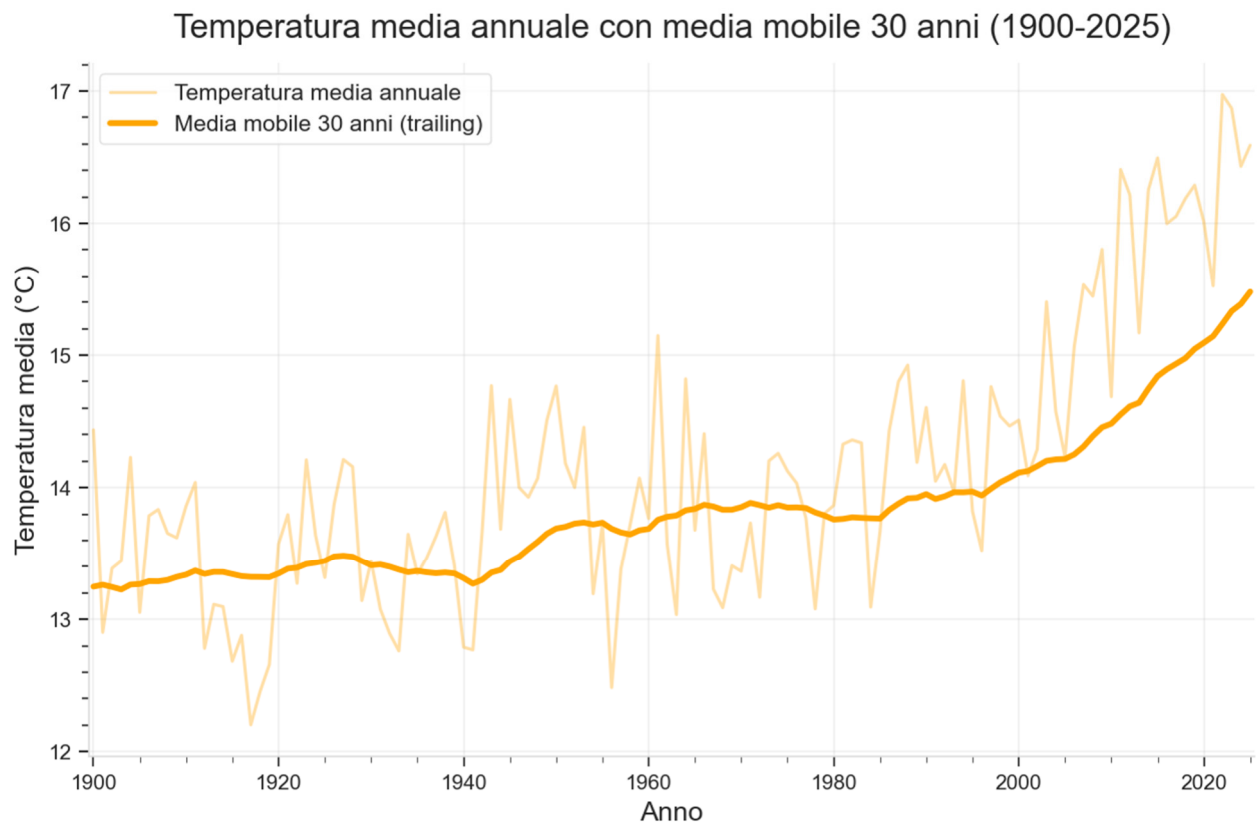


Figura 4: Andamento della temperatura media annuale con media mobile a 30 anni (Milano Brera)

La variazione di temperatura rispetto al periodo di riferimento 1971-2000 è rappresentata nei grafici seguenti, che illustrano l'andamento della temperatura media annua (Figura 5), la temperatura media stagionale (Figura 6) e l'andamento della temperatura media mensile (Figura 7).

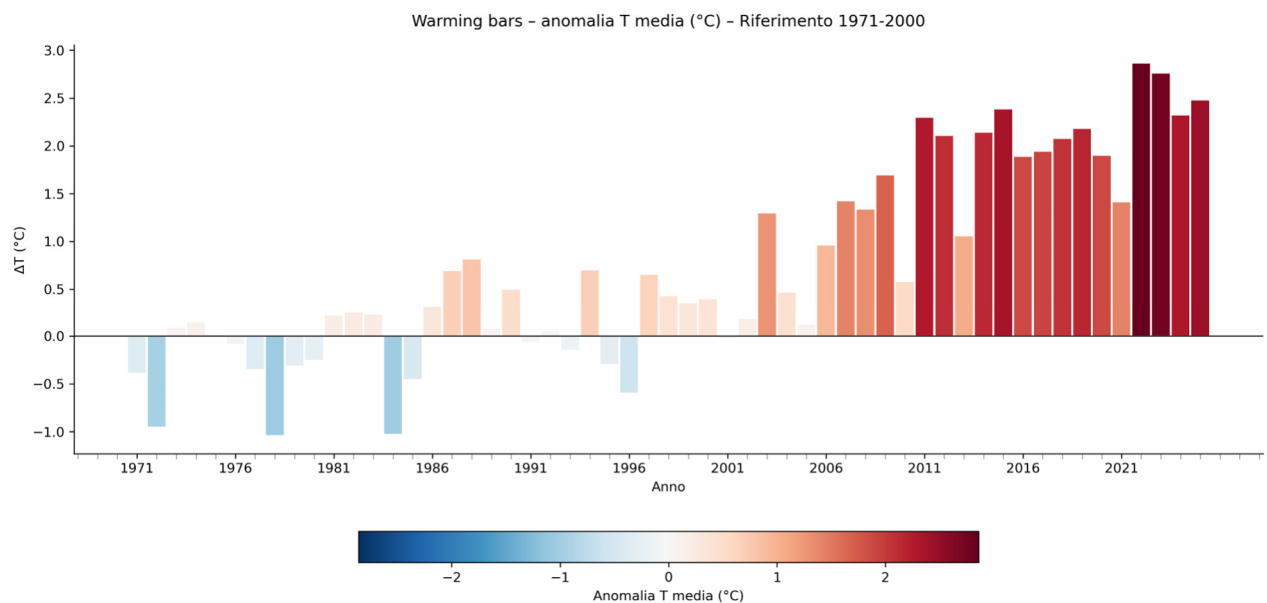


Figura 5: Variazioni della temperatura media annuale rispetto al periodo 1971-2000 (Milano Brera)

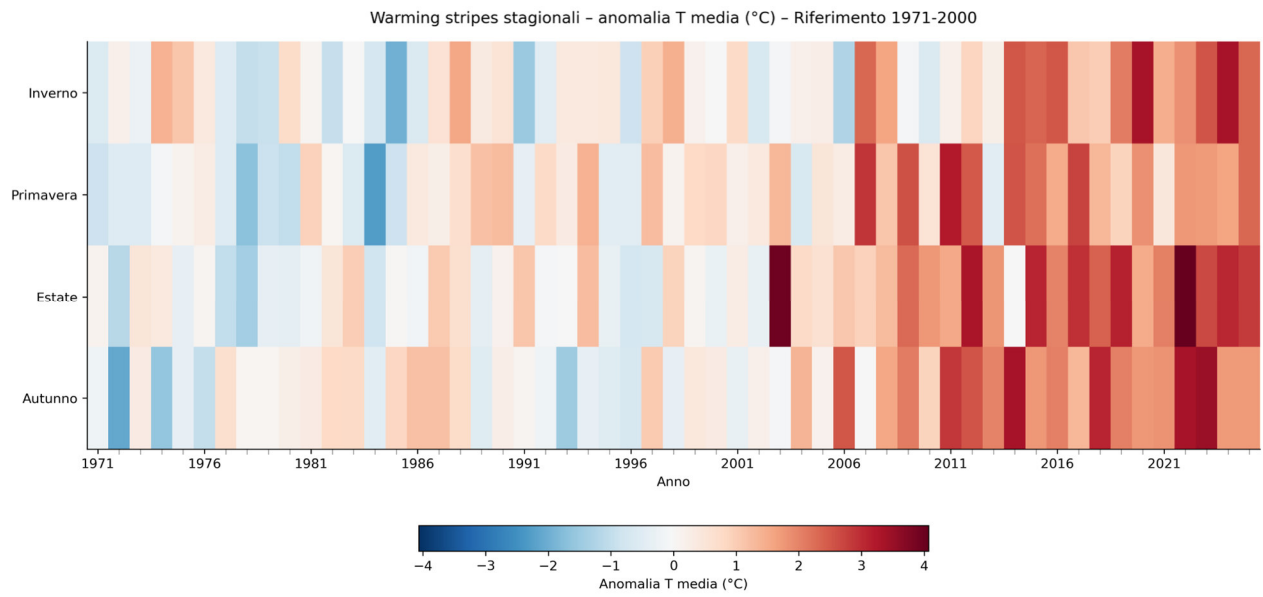


Figura 6: Variazioni della temperatura media stagionale rispetto al periodo 1971-2000 (Milano Brera)

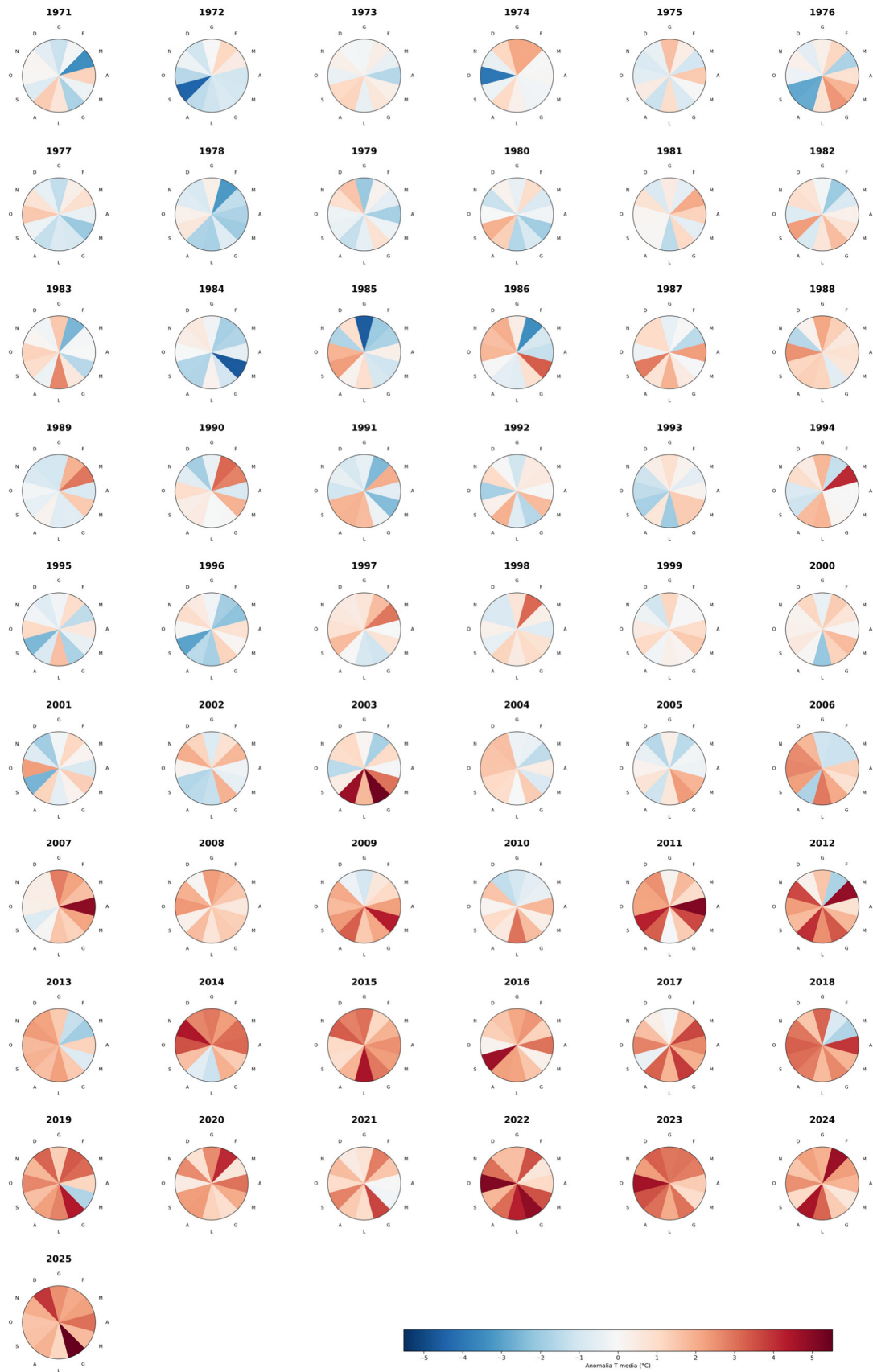


Figura 7: Variazioni della temperatura media mensile rispetto al periodo 1971-2000 (Milano Brera)

Appare evidente l'aumento sempre più marcato delle temperature sia in riferimento alla media annuale che rispetto alle diverse stagioni ed infine anche rispetto ai singoli mesi.

A livello stagionale, le tendenze sul periodo 1971-2025 sono in aumento, sia per le temperature minime che per le temperature massime. Un approfondimento è riportato in Appendice 1.

Oltre alla variazione di temperatura riscontrata puntualmente nella stazione di Milano Brera, nella città di Milano va considerato anche l'effetto isola di calore.

Un'isola di calore urbano (Urban Heat Island, UHI) è un fenomeno climatico caratterizzato da temperature più elevate nelle aree urbane rispetto alle aree rurali circostanti o anche differenti tra aree diverse della città, principalmente causato dalle caratteristiche microclimatiche e fisiche delle diverse zone quali ad esempio il colore ed il tipo di superfici, le caratteristiche degli edifici presenti (altezza, materiali, tipo di copertura) e altre variabili locali.

La stima del contributo dell'effetto dell'isola di calore urbano è oggetto di differenti studi e modelli, con effetti anche molto localizzati.

Nell'ambito del presente documento si è effettuato un approfondimento analizzando quattro stazioni meteo, due riferite all'ambito urbano (ubicate nel quartiere di Brera e in V.le Marche) e due riferite a zone più periferiche e rurali (ubicate in zona Lambrate e V.le Feltre), analizzando i dati riferiti ad una settimana calda di luglio 2022 (Figura 8).

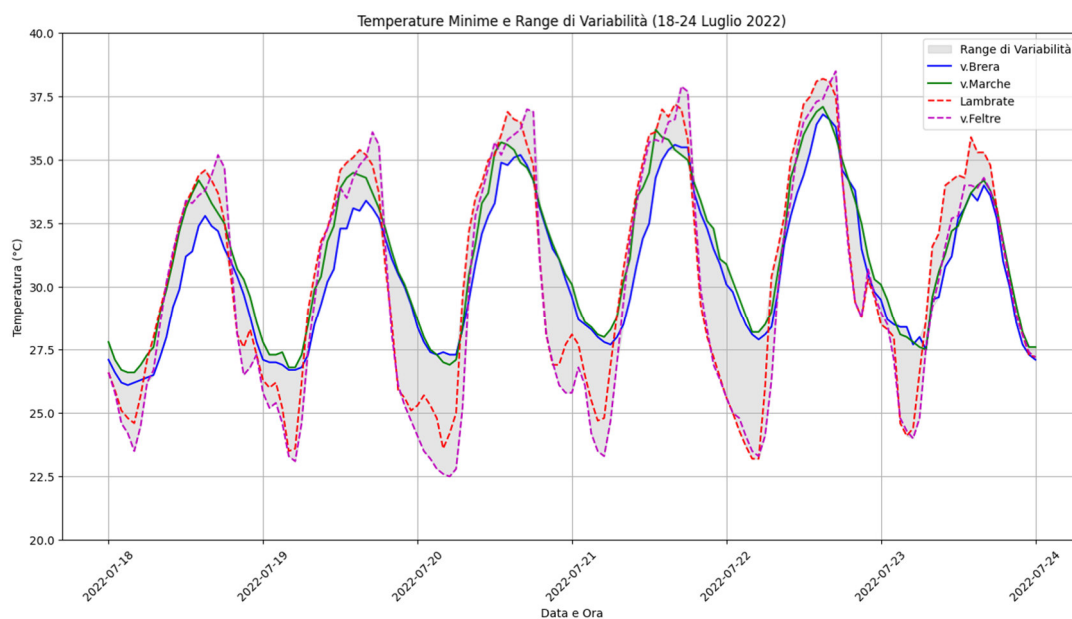


Figura 8: Variabilità temperatura minima estiva - confronto tra stazioni

Si è focalizzata l'attenzione sulle temperature notturne, in quanto durante il giorno le rilevazioni possono risentire di effetti microclimatici locali sui sensori dovuti all'ubicazione specifica (presenza di aree pavimentate nelle vicinanze, altezza dei sensori dal suolo). In queste circostanze la differenza di temperatura tra aree urbane e aree rurali può arrivare anche a valori prossimi a 5 °C, come mostrano le temperature minime rilevate presso la stazione di Via Feltre e quelle della stazione di Brera (Figura 9).

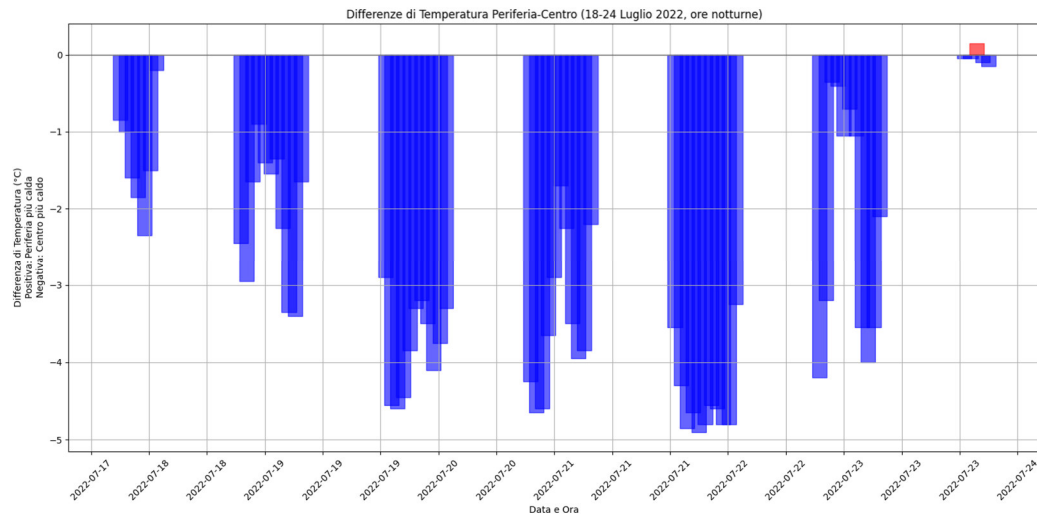


Figura 9: Differenza di temperatura minima estiva notturna - confronto tra stazioni

4.2 Gradi giorno di riscaldamento

I Gradi Giorno di Riscaldamento (Heating Degree Days, HDD) sono un parametro utilizzato per quantificare la domanda energetica necessaria per riscaldare gli edifici durante la stagione fredda. Questo valore rappresenta la somma delle differenze giornaliere tra la temperatura interna convenzionale di comfort (stabilita a 20 °C) e la temperatura media esterna, considerando solo i giorni in cui quest'ultima scende al di sotto di una soglia prefissata (fissata a 20 °C per l'Italia).

In Italia, la definizione e il calcolo dei Gradi Giorno sono regolati dal D.P.R. 26 agosto 1993, n. 412, che disciplina il rendimento energetico degli edifici e fornisce una suddivisione del territorio nazionale in sei zone climatiche, dalla A (più calda) alla F (più fredda). Ogni comune è classificato in base al numero di Gradi Giorno medi annui, determinati da rilevazioni climatiche pluriennali. Questa classificazione è fondamentale per definire i periodi e le ore giornaliere in cui è consentito il funzionamento degli impianti di riscaldamento. Per la città di Milano, che si trova nella zona climatica E, il valore dei Gradi Giorno è pari a **2.404**.

Gradi Giorno di Riscaldamento (HDD) (temperatura di riferimento 20°C)

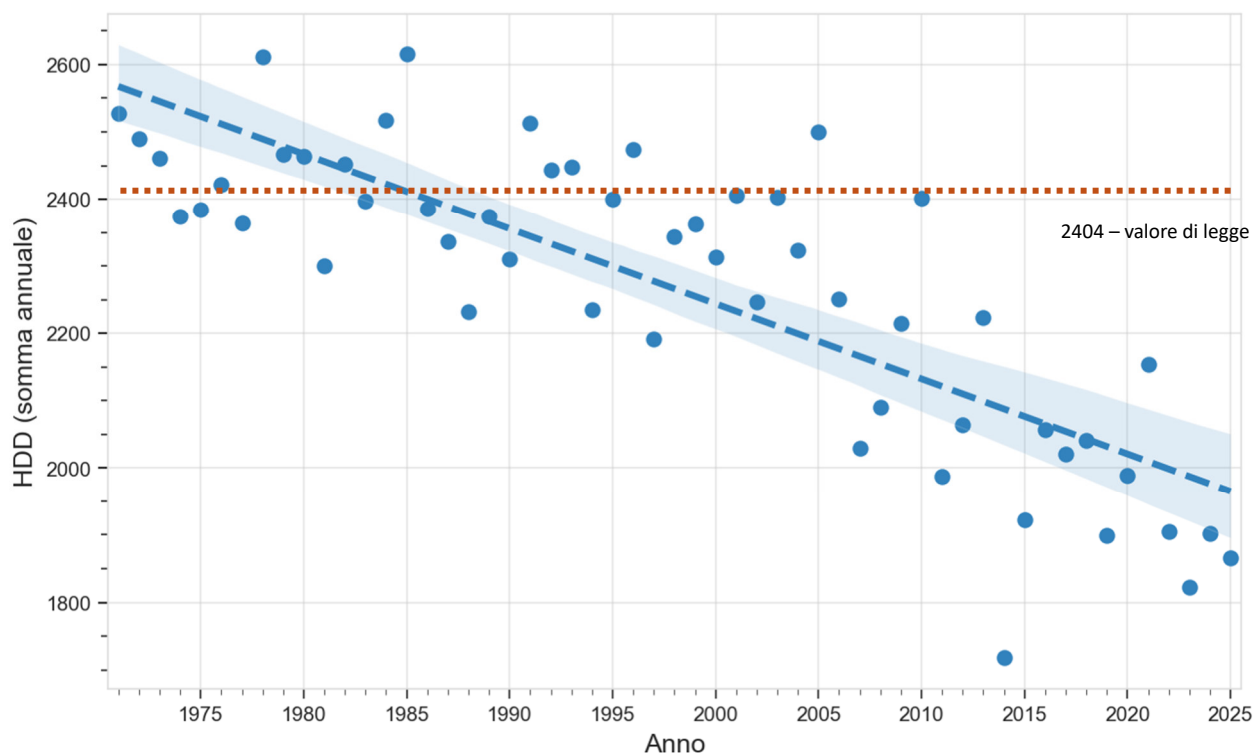


Figura 10: Andamento Gradi Giorno di Riscaldamento (Milano Brera)

Analizzando i dati storici (Figura 10), si evidenzia un trend di diminuzione dei Gradi Giorno di riscaldamento, coerente con quanto precedentemente illustrato rispetto all'innalzamento delle temperature medie dell'aria, con un trend di circa 11 gradi giorni in meno per ogni anno.

4.3 Gradi giorno di raffrescamento

Analogamente a quanto detto per i Gradi Giorno di Riscaldamento, i Gradi Giorno di Raffrescamento (Cooling Degree Days, CDD) sono un parametro utilizzato per stimare la domanda energetica necessaria per raffrescare gli edifici durante la stagione calda, quantificando il surplus di temperatura esterna rispetto a una soglia considerata ottimale per il comfort interno, tipicamente stabilita a 24 °C in Italia⁴.

Il calcolo dei CDD avviene sommando, su base giornaliera, la differenza tra la temperatura media esterna e la soglia di comfort (24 °C), considerando solo i giorni in cui la temperatura media supera questa soglia.

Gradi Giorno di Raffrescamento(CDD) (temperatura di riferimento 24°C)

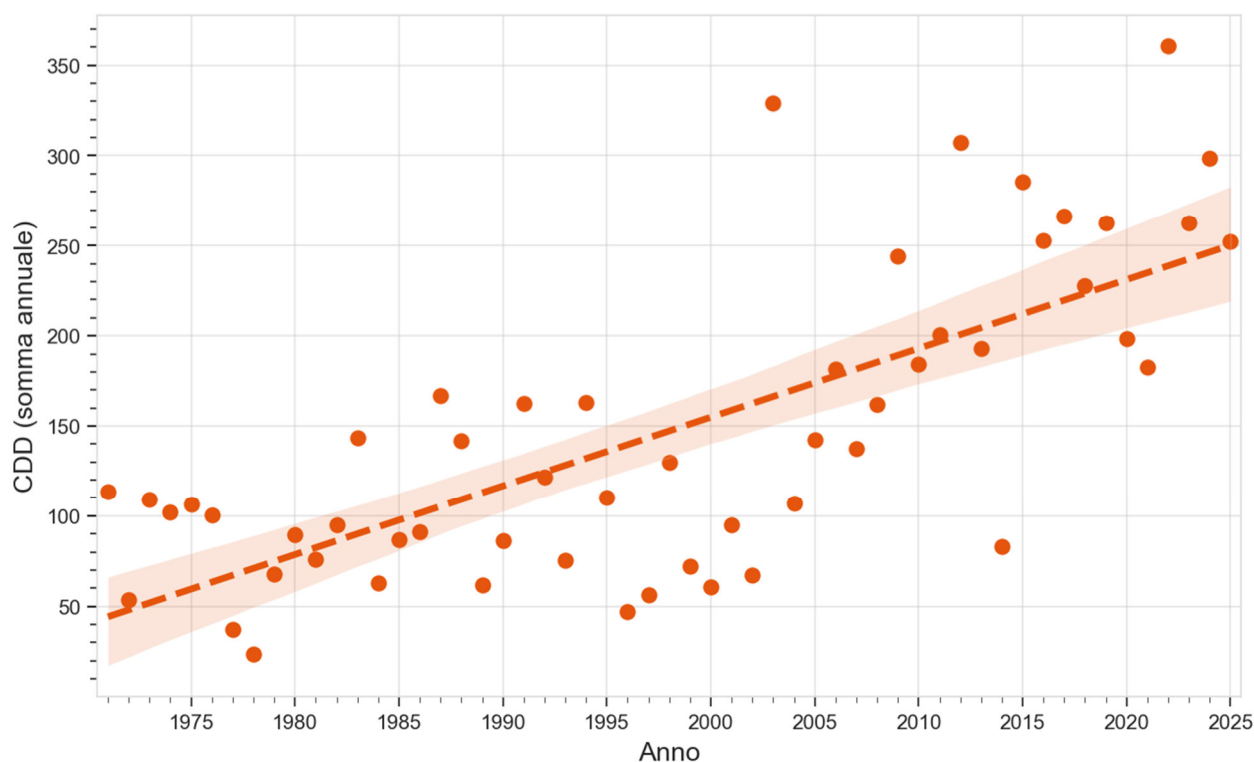


Figura 11: Andamento Gradi Giorno di Raffrescamento (Milano Brera)

Analizzando i dati storici (Figura 11), si evidenzia un trend di aumento dei Gradi Giorno di Raffrescamento, con un trend nel periodo 1971-2025 di circa 4 gradi giorni in più per ogni anno: in 50 anni, il fabbisogno di raffrescamento è più che triplicato, passando da valori medi intorno a 60–80 CDD negli anni '70 a oltre 250–300 negli ultimi anni.

⁴ UNI 10349-3:2016

4.4 Giorni freddi

Nell'analisi invernale, gli indicatori che vengono tipicamente utilizzati riguardano il numero di giorni con gelo (FD – Frozen Days), ovvero i giorni in cui la temperatura minima è inferiore a 0 °C, e il numero di giorni con ghiaccio (Txlce), definito come numero di giorni in cui la temperatura minima e massima sono inferiori a 0 °C.

L'analisi di Frozen Days e Txlce è fondamentale per comprendere gli effetti locali del cambiamento climatico. Un progressivo processo di riscaldamento porta tipicamente a una diminuzione di entrambi i parametri, con inverni più miti e una riduzione delle giornate di gelo persistente. Tuttavia, eventi estremi come ondate di freddo anche intenso possono ancora verificarsi.

Dall'analisi dei dati riferiti alla stazione di Brera appare evidente che le condizioni sopra esposte sono in rapida diminuzione (Figura 12): le giornate in cui anche le massime restano sotto zero rimangono molto rare, ormai 1 o 2 all'anno.

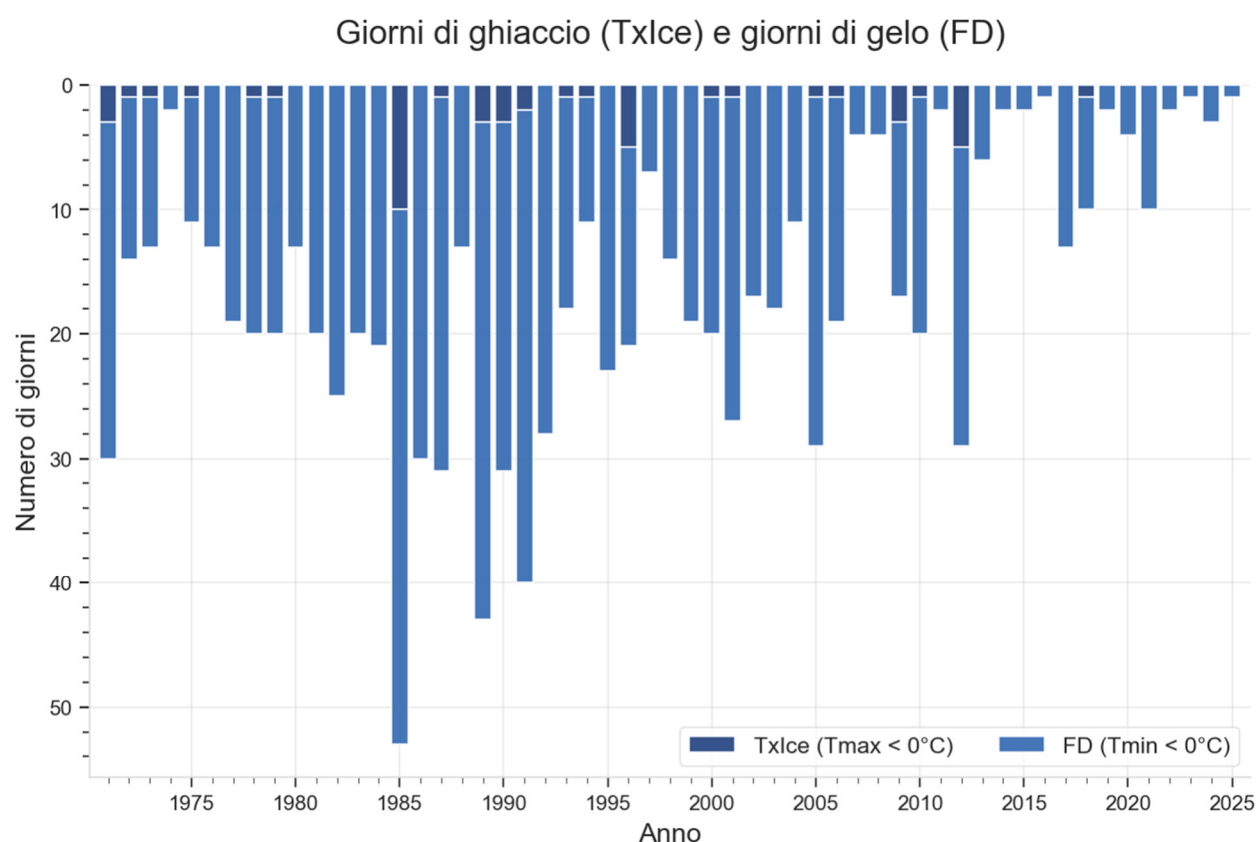


Figura 12: Numero di giorni di gelo e di ghiaccio (Milano Brera)

Dal confronto con i dati della stazione di Milano Lambrate (Figura 13) si evidenzia ancora una volta la differenza tra aree urbane e aree periferiche, dove i giorni di gelo rimangono ancora presenti, seppure anche in questo contesto sia evidente la progressiva diminuzione.

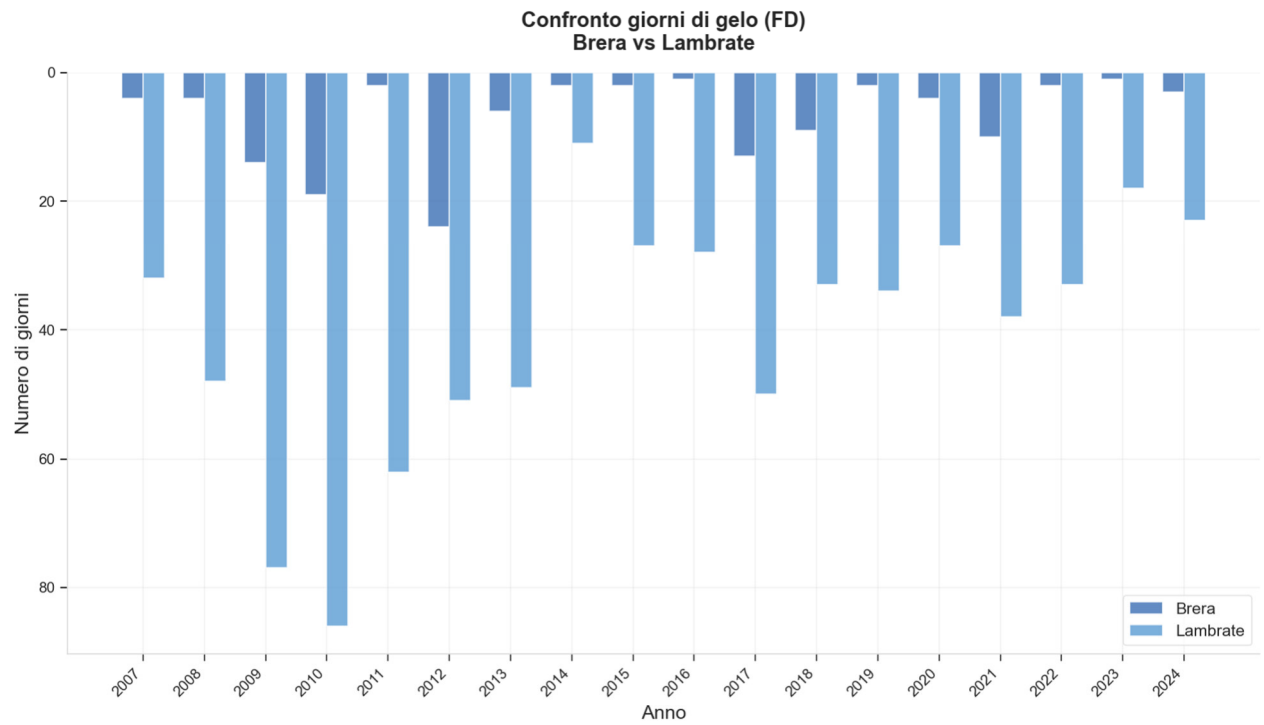


Figura 13: Confronto numero di giorni di gelo (Milano Brera – Milano Lambrate)

5 ANALISI CLIMATICA DELLO STRESS TERMICO

Negli ultimi decenni il riscaldamento globale ha modificato in modo sensibile la frequenza e l'intensità degli episodi di caldo. Per comprendere come queste variazioni si manifestano sul territorio, non basta guardare alla temperatura media: servono indicatori che descrivano come cambia la frequenza dei giorni e delle notti più calde e quanto durano gli episodi estremi.

Tra i più utilizzati ci sono i Summer Days (SU), le Tropical Nights (TR) e l'indicatore di Warm Spell Duration Index (WSDI).

- Summer Days (SU): rappresentano il numero di giorni in cui la temperatura massima supera i 25 °C. Sono utili per quantificare la durata e la frequenza dei periodi estivi caldi, con effetti diretti sul comfort termico, sui consumi energetici per il raffrescamento e sullo stress termico della popolazione.
- Tropical Nights (TR): indicano le notti in cui la temperatura minima è maggiore di 20 °C. Queste notti "tropicali" impediscono il naturale raffrescamento notturno, con conseguenze importanti per la salute, in particolare per le persone più vulnerabili e per chi vive in aree densamente urbanizzate.
- Warm Spell Duration Index (WSDI): misura la durata delle ondate di calore, contando i periodi di almeno sei giorni consecutivi in cui le temperature massime superano il 90° percentile del periodo di riferimento. Questo indice viene calcolato anche nel periodo invernale, mentre generalmente le ondate di calore si riferiscono al periodo estivo. In questo caso il termine "ondata di calore" va inteso come "periodo caldo anomalo". Questo indice consente di distinguere un singolo giorno molto caldo da un evento di calore persistente, che può avere impatti molto più gravi su salute, agricoltura, ecosistemi e infrastrutture.

Monitorare questi indicatori nel tempo è fondamentale per comprendere come il clima locale sta cambiando e quali effetti concreti il riscaldamento globale produce nella vita quotidiana. L'aumento dei Summer Days e delle Tropical Nights, insieme a ondate di calore sempre più lunghe, rappresenta un segnale chiaro del riscaldamento in atto e aiuta amministrazioni, urbanisti e servizi sanitari a pianificare strategie di adattamento: dalla progettazione di spazi urbani più resilienti, alla gestione delle emergenze estive, fino alla riduzione della domanda energetica.

In sintesi, questi indicatori non misurano solo il "quanto" fa caldo, ma anche in che modo il caldo sta cambiando la nostra quotidianità.

Così come effettuato per le analisi riguardanti la temperatura, anche quelle riguardanti lo stress termico sono state svolte principalmente rispetto alla stazione di Milano Brera, significativa sia per la serie storica disponibile sia perché comunque caratterizzante la situazione in Milano, con alcuni paragoni con la stazione di Milano Lambrate per evidenziare le principali differenze.

5.1 Giornate estive

L'indicatore Summer Days (SD) è utilizzato per misurare la frequenza di giorni caldi in un determinato periodo. In letteratura Summer Day è definito come un giorno in cui la temperatura massima supera i 25 °C.

Si è indagato l'andamento di questo indice negli anni per la stazione di Milano Brera, con riferimento sia alla soglia dei 25 °C che alla soglia dei 30 °C, per iniziare ad indagare anche il superamento di soglie di valori più elevati e maggiormente correlati ad eventuali situazioni di disagio psicofisico (Figura 14).

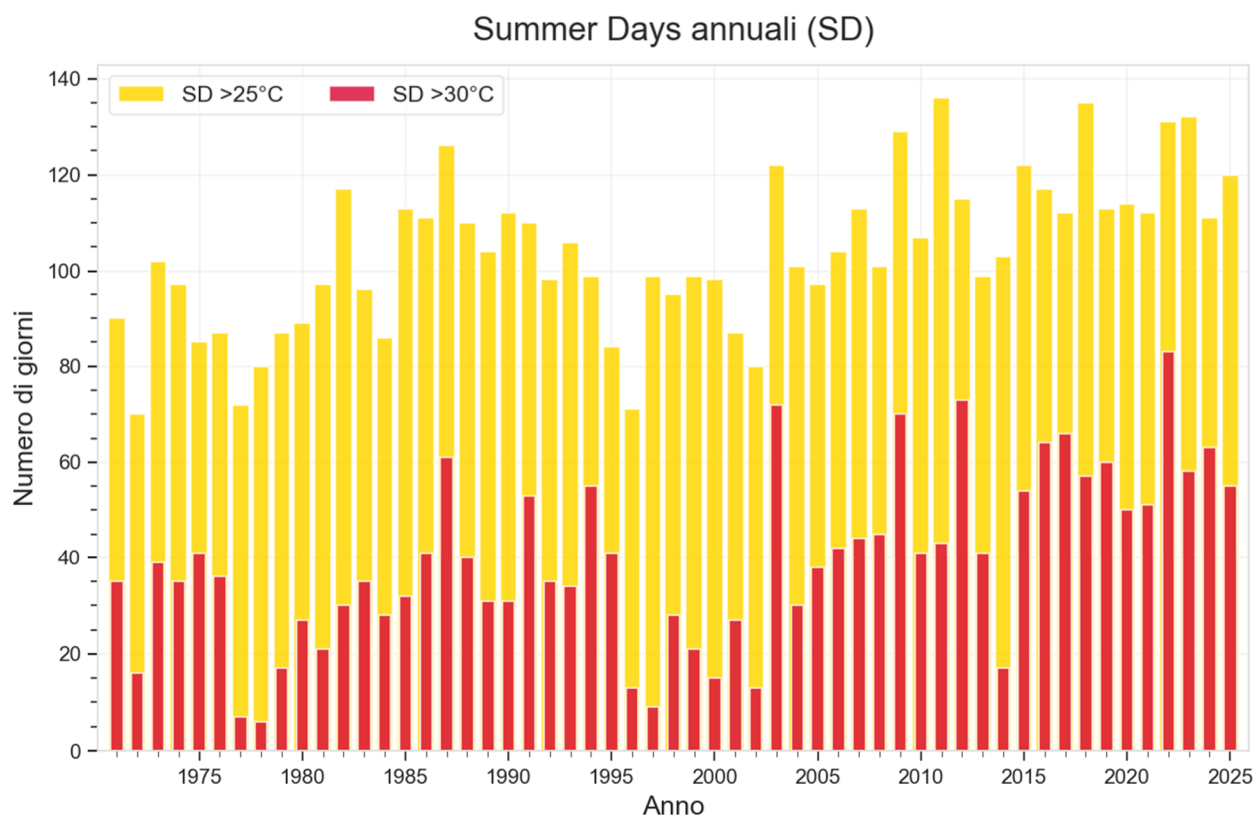


Figura 14: Summer days per anno (Milano Brera)

Appare evidente come siano in aumento i giorni con temperatura massima superiore a 30 °C.

Si è indagato anche la ricorrenza di giorni con temperatura media superiore 35 °C, di particolare interesse per quanto concerne la tutela della salute e sicurezza di lavoratori negli ambienti di lavoro⁵. In questo caso si è fatto riferimento al valore “**Heat Index**” che tiene conto anche dei tassi di umidità relativa dell’aria, con i dati di umidità per la stazione di Milano Brera che sono disponibili dal 2003, dando una indicazione su una sorta di “temperatura percepita”⁶.

Anche in questo caso risulta evidente il trend di aumento di queste occorrenze.

⁵ Si vedano ad esempio: <https://www.inps.it/it/it/inps-comunica/notizie/dettaglio-news-page.news.2023.07.integrazione-salariale-per-eventi-meteo-temperature-elevate-indicazioni.html> e https://www.inps.it/it/it/inps-comunica/atti/circolari-messaggi-e-normativa/dettaglio.circolari-e-messaggi.2024.07.messaggio-numero-2736-del-26-07-2024_14642.html

⁶ Per una definizione di “temperatura percepita”, si faccia riferimento ad esempio a https://www.meteo.dfg.unito.it/vocabolario-Temperatura_percepita

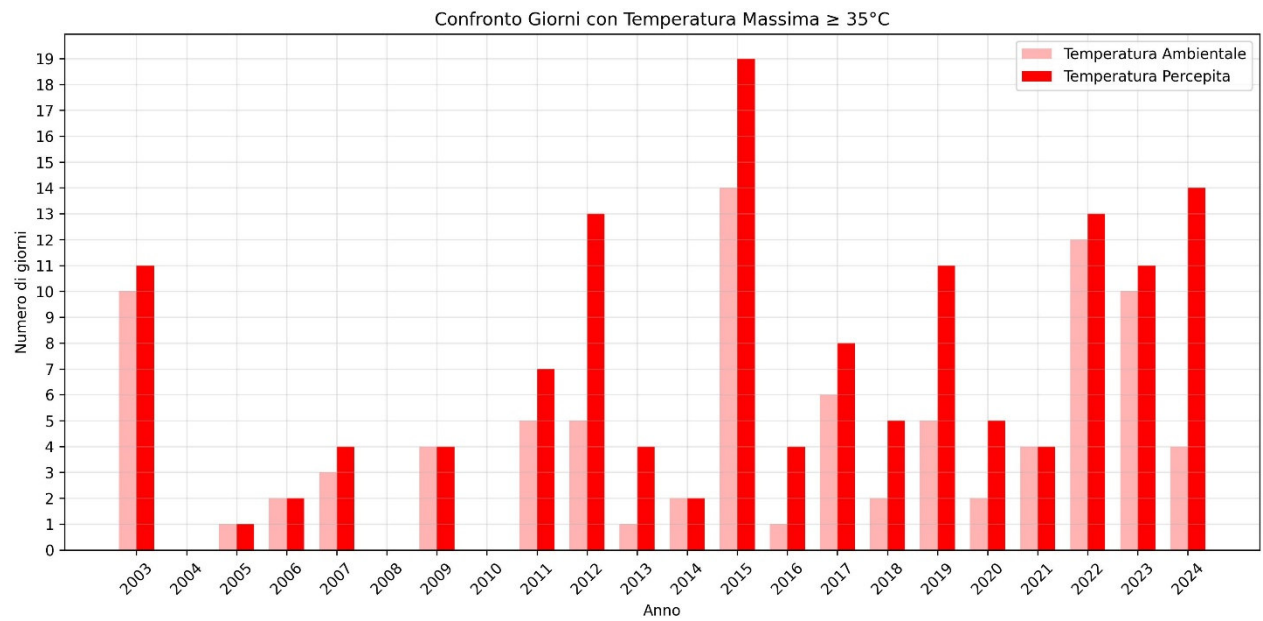


Figura 15: Numero di giorni con temperatura media superiore a 35°C
temperatura ambientale misurata e temperatura percepita (Milano Brera)

5.2 Notti tropicali

Un altro indicatore utilizzato per descrivere l'evoluzione del clima è il numero di giorni con temperatura minima maggiore di 20 °C, definito come il numero di notti tropicali.

Di seguito (Figura 16) si riporta l'elaborazione dell'indicatore delle notti tropicali per la stazione di Milano Brera, con riferimento sia alla temperatura minima di 20 °C, ma anche con informazioni relative a 25 °C e 28 °C, analogamente a quanto fatto con l'indicatore Summer Days, per iniziare ad indagare ulteriori soglie critiche.

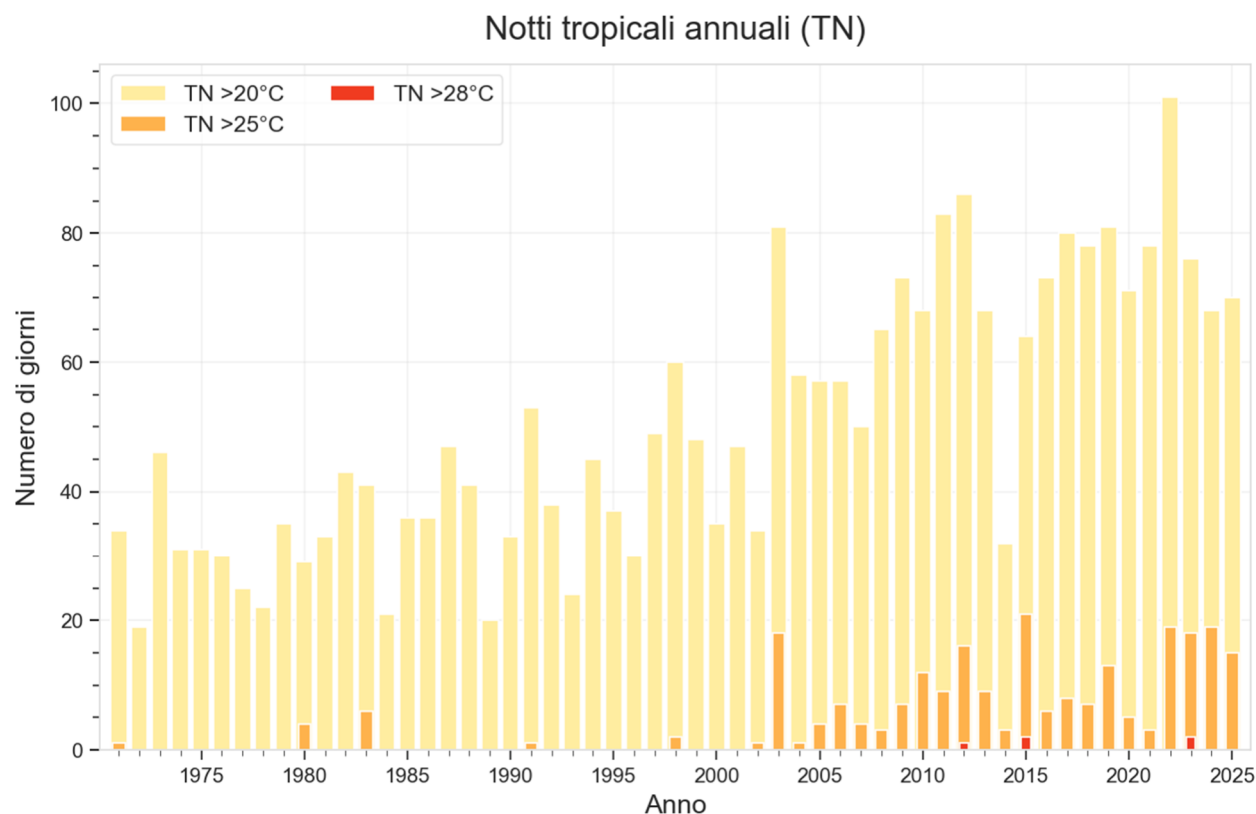


Figura 16: Numero di notti tropicali per anno (Milano Brera)

Come si evince chiaramente dal grafico, il numero di notti tropicali è in sensibile aumento: nel periodo 1971-2000 il numero di notti tropicali medio è di circa 36, mentre nel periodo 2001-2025 è raddoppiato, con un valore di circa 68.

Importante rilevare che stanno aumentando anche i giorni in cui la temperatura non scende sotto ai 25 °C e iniziano a riscontrarsi giorni in cui la temperatura minima non scende sotto ai 28 °C.

Si è inoltre indagato quante di queste notti tropicali avvengono consecutivamente, riscontrando anche in questo caso un aumento delle occorrenze. Di particolare rilevanza l'anno 2022, che ha fatto registrare il record di 101 notti tropicali, di cui 47 consecutive. Aumentando le notti tropicali, aumentano di conseguenza anche il numero di notti tropicali "consecutive", certificando una maggiore durata delle ondate di calore, che soprattutto in città impattano negativamente sulle condizioni psicofisiche della popolazione.

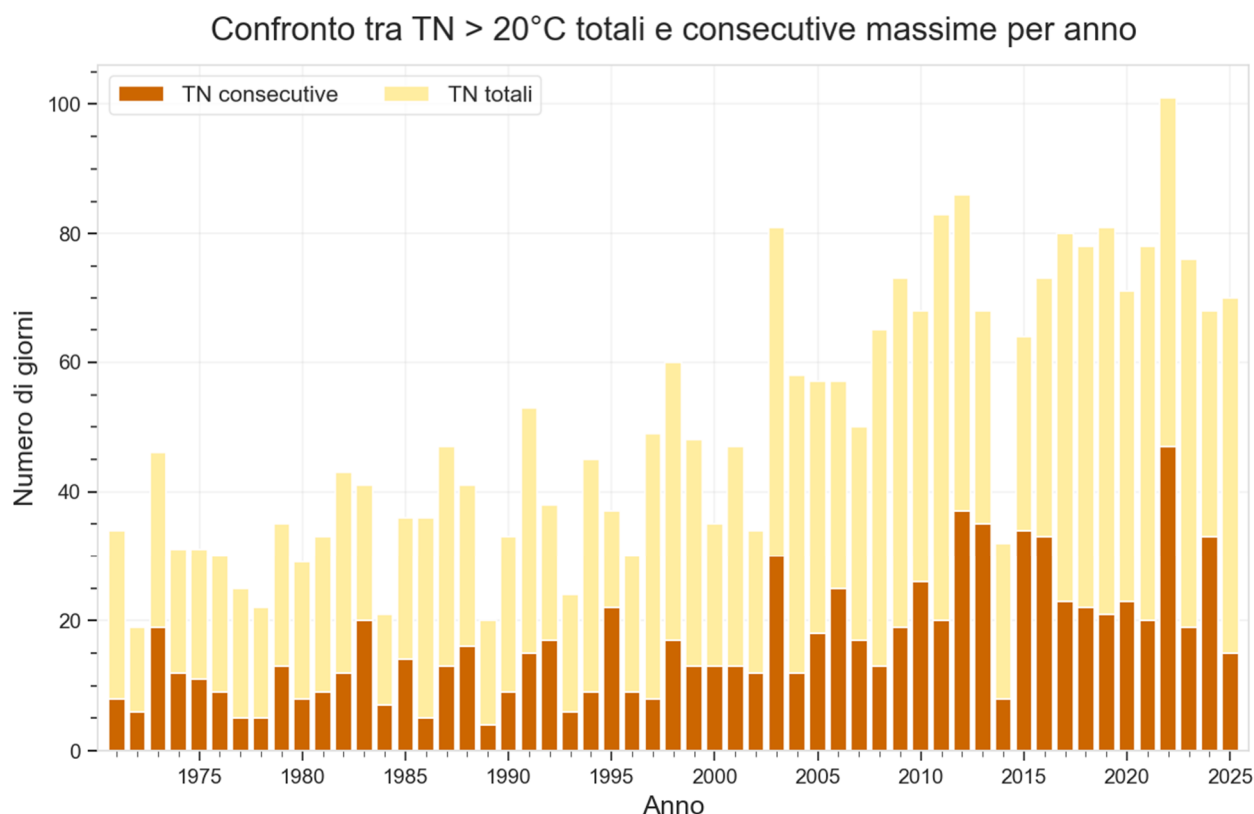


Figura 17: Numero di notti tropicali consecutive per anno (Milano Brera)

Il confronto tra una situazione in area centrale come Milano Brera e un'area più periferica come Milano Lambrate evidenzia come le condizioni microclimatiche influiscano, pur confermando la tendenza all'aumento in entrambi i contesti. Nel periodo 2007-2024, il valore medio di notti tropicali a Milano Lambrate è risultato pari a 27 giorni, un valore più basso di quanto registrato a Brera nel periodo 1971-2000, anche se la tendenza degli anni più recenti è di valori superiori ai 30 giorni.

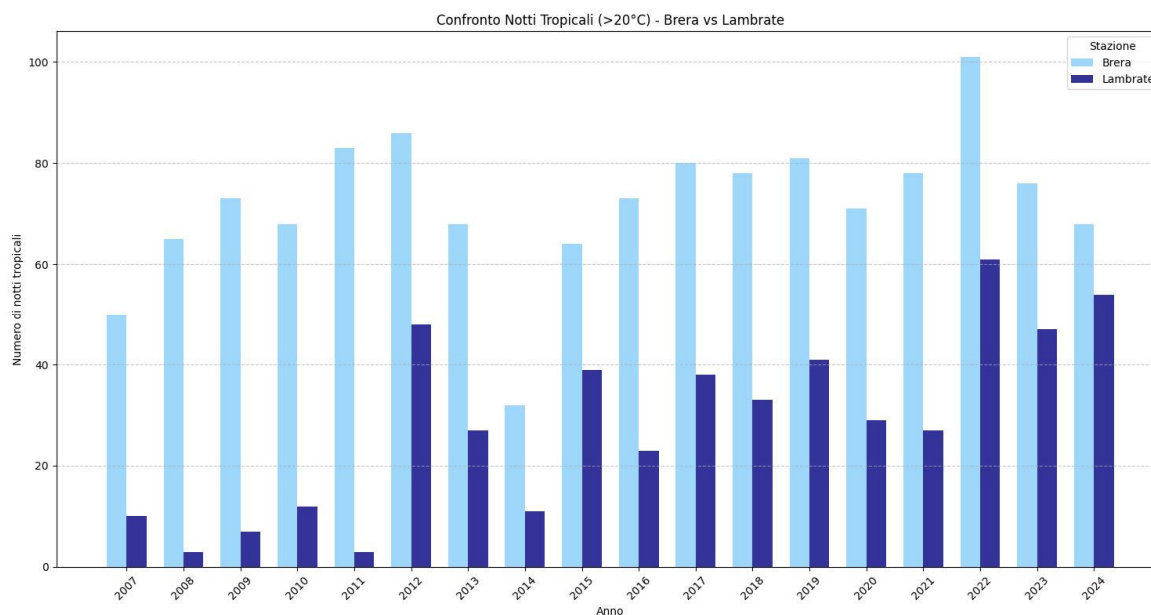


Figura 18: Confronto numero di notti tropicali per anno (Milano Brera – Milano Lambrate)

5.3 Ondate di calore

L'incremento delle temperature sul lungo periodo, discusso nei capitoli precedenti, è seguito anche dall'incremento del numero massimo di giorni consecutivi con temperatura massima insolitamente alta per il periodo, cioè la durata delle onde di calore, che viene indagato utilizzando l'indicatore climatico WSDI.

In particolare, l'indicatore WSDI (Warm Spell Duration Index) è stato calcolato secondo gli standard ETCCDI/WMO, ovvero considerando la temperatura massima giornaliera per tutto l'anno. Si identifica un'ondata di calore quando, per almeno sei giorni consecutivi, la temperatura massima supera il 90° percentile giornaliero⁷ calcolato sul periodo di riferimento (1971–2000), utilizzando una finestra mobile di ± 2 giorni per tener conto della stagionalità. Per ogni ondata vengono registrate la data di inizio, la durata e la temperatura massima più elevata, in modo da descrivere l'intensità e la persistenza dei periodi di caldo anomalo.

Come già accennato in precedenza, l'indicatore WSDI misura la durata dei periodi di caldo intenso e prolungato. In questo capitolo si utilizza per semplicità la dicitura “ondate di calore” anche normalmente con questo termine si intendono i soli periodi di caldo estivo.

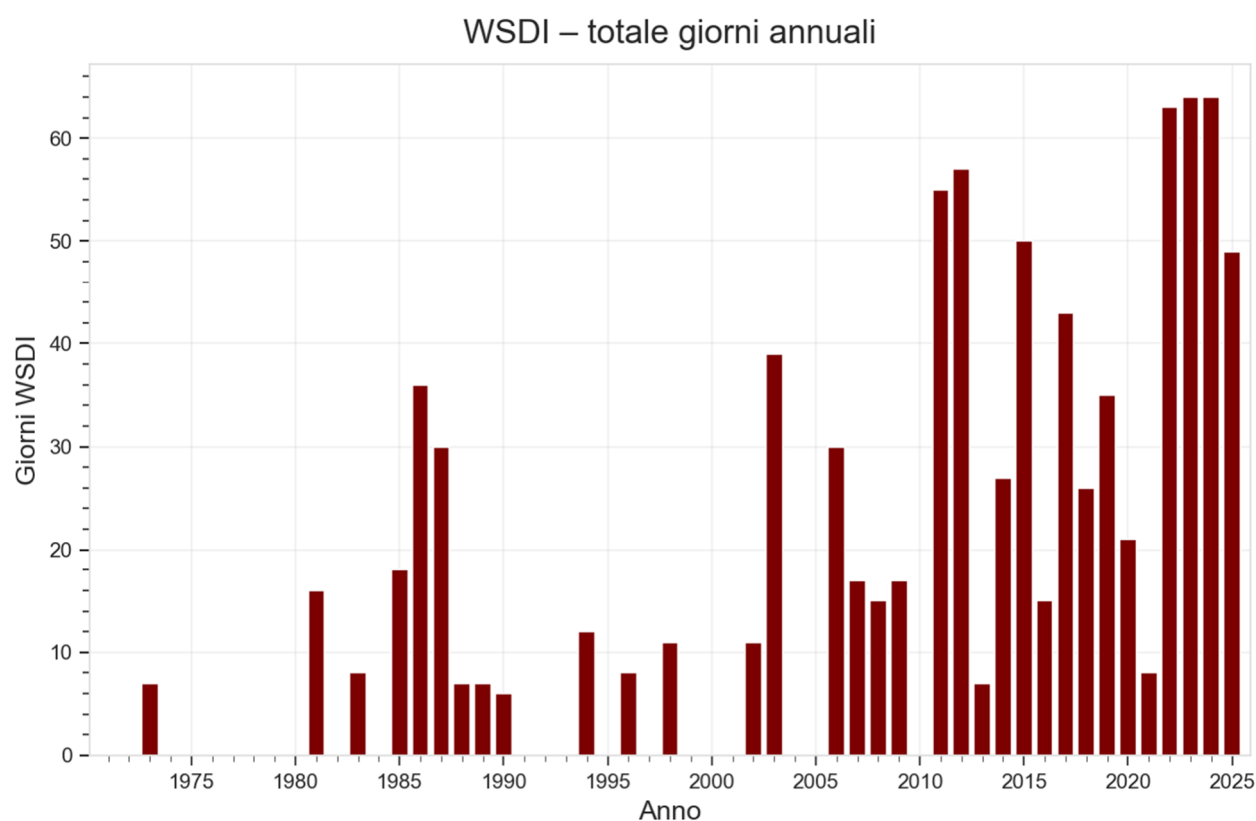


Figura 19: Andamento ondate di calore (Milano Brera)

Si osserva un periodo, compreso tra 1970-1980, con un numero basso di onde di calore, mentre dopo gli anni '90 è avvenuto un raddoppio, in media, delle onde di calore, con una tendenza crescente statisticamente significativa.

⁷ Quando la temperatura massima di un giorno supera il 90° percentile, significa che è più alta di quanto si osserva nel 90% dei giorni simili nel periodo di riferimento. In altre parole, è una temperatura eccezionalmente alta per quella stagione, cioè più calda del normale.

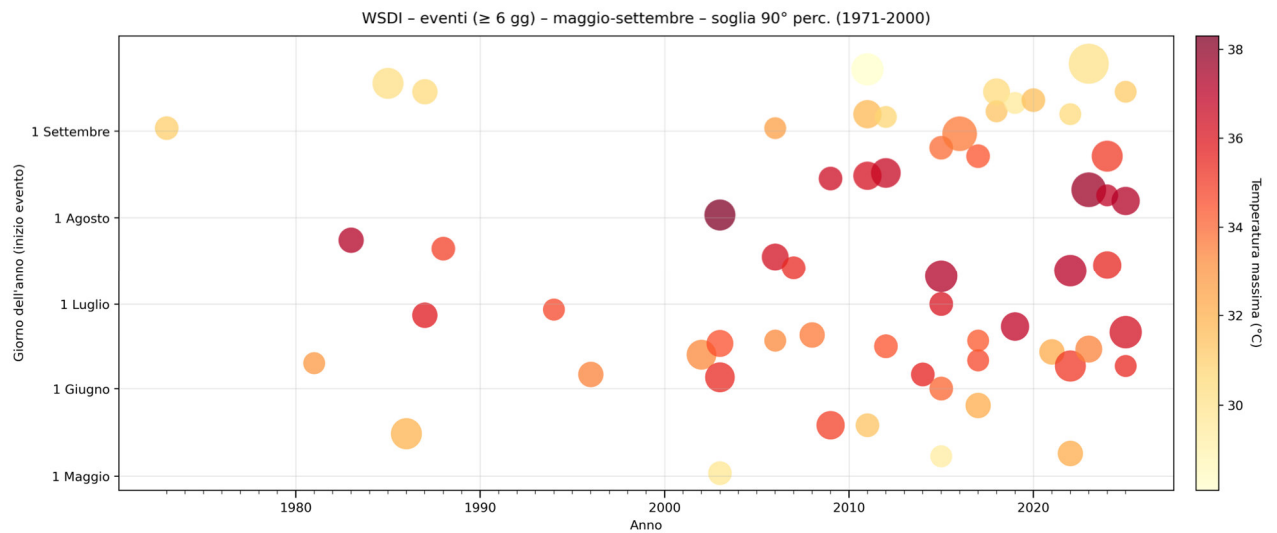


Figura 20: Andamento temporale ondate di calore (Milano Brera)

Negli anni, le ondate di calore sono diventate più lunghe e intense, con un'estensione del periodo in cui si verificano. Questo andamento è evidenziato in Figura 20, che propone un focus sul periodo estivo. Nell'immagine la dimensione dei cerchi rappresenta la durata e la gradazione di colore ne indica l'intensità: si nota come, negli ultimi anni, eventi importanti di ondate di calore abbiano avuto inizio già a giugno, protraendosi fino ai primi di settembre.

6 ANALISI CLIMATICA DELLE PRECIPITAZIONI

6.1 Precipitazione cumulata: tendenze e cambiamenti

Lo studio della variabilità climatica della quantità di precipitazione annua ha evidenziato un generale segnale di tendenza alla diminuzione.

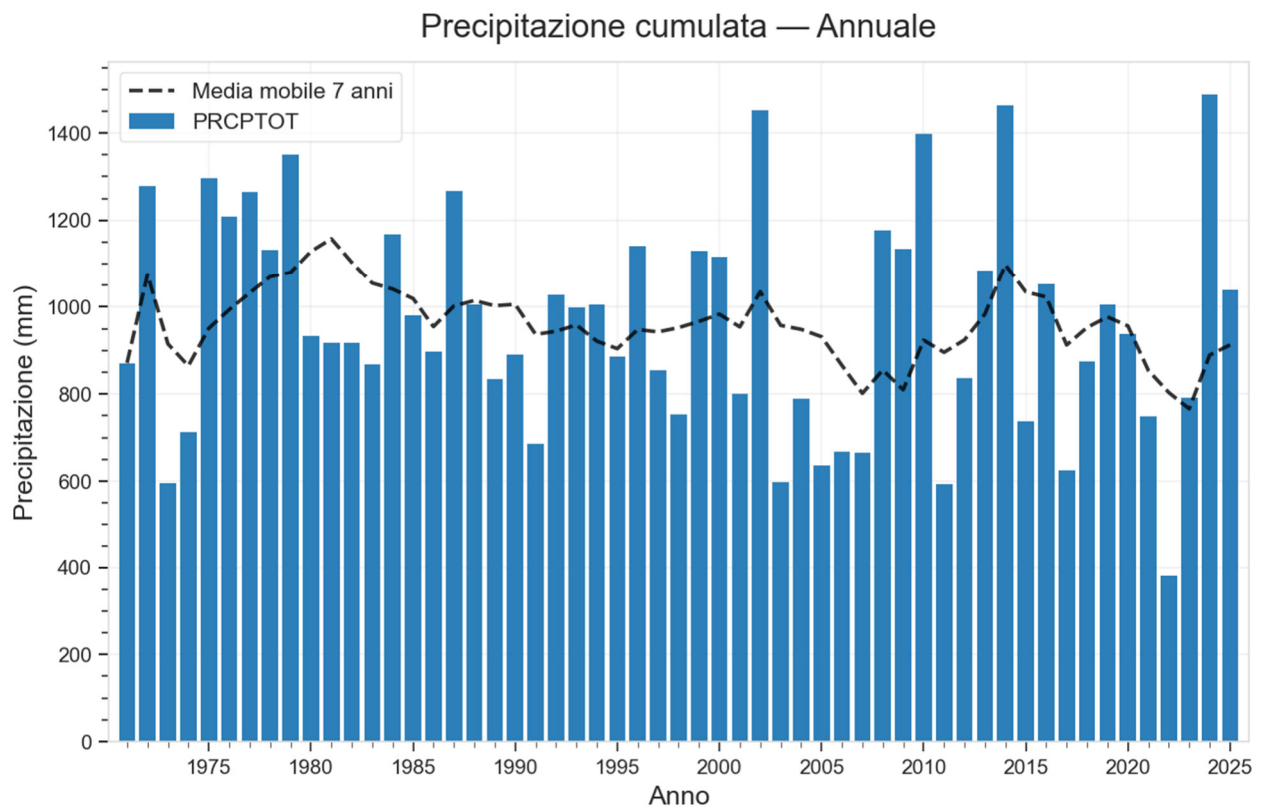


Figura 21: Precipitazione cumulata annua (Milano Brera)

Come si evince dal grafico precedente (Figura 21), a fronte di una generale diminuzione, vi sono anni con valori di precipitazione complessiva elevati come il 2014 o il recente 2024.

Il trend in diminuzione è, inoltre, individuabile anche in alcune differenti stagioni, come riportato nelle illustrazioni seguenti.

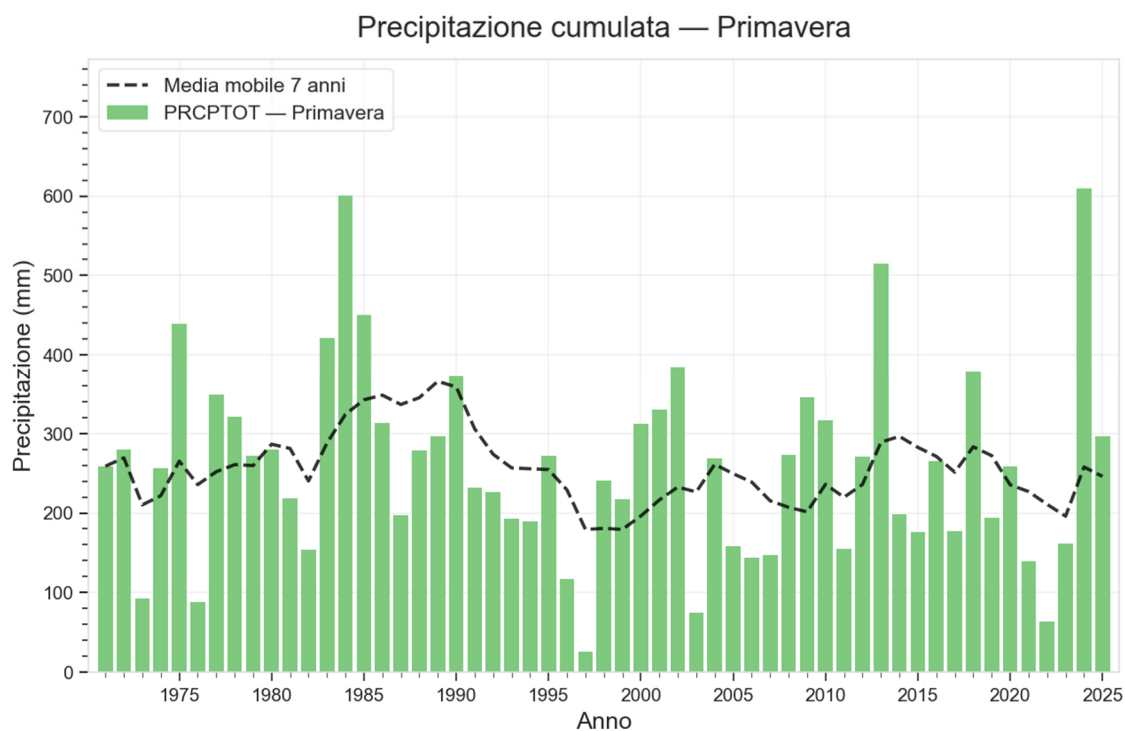


Figura 22: Precipitazione cumulata - primavera (Milano Brera)

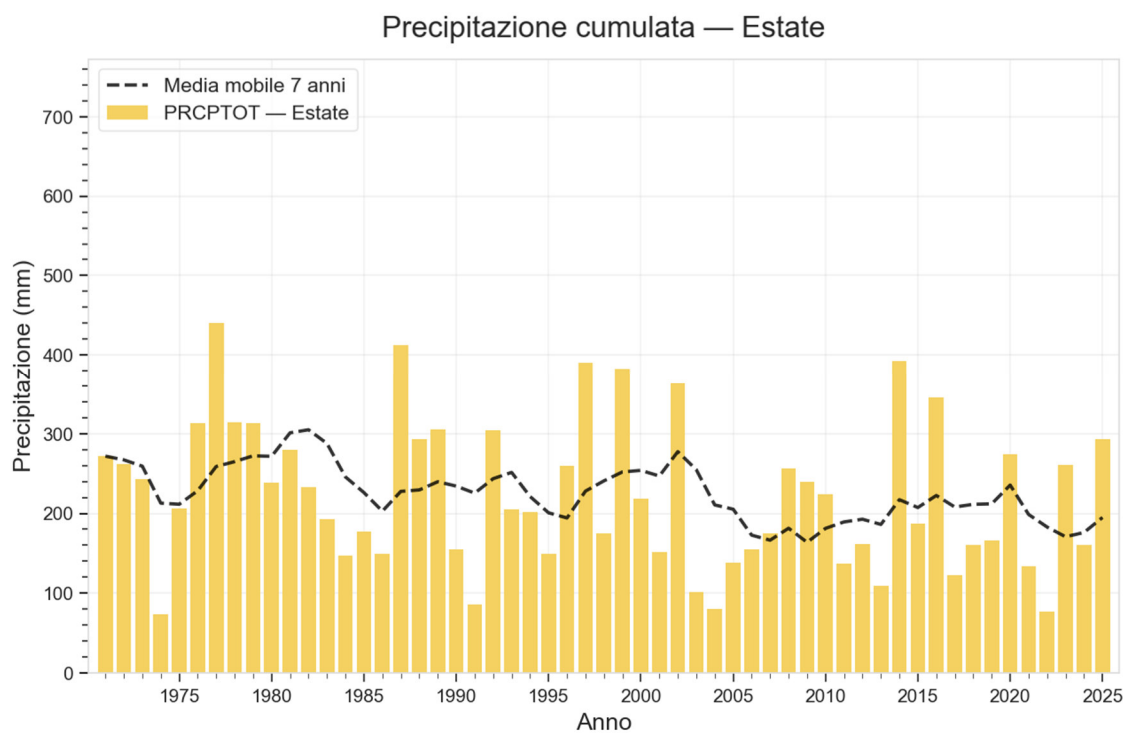


Figura 23: Precipitazione cumulata - estate (Milano Brera)

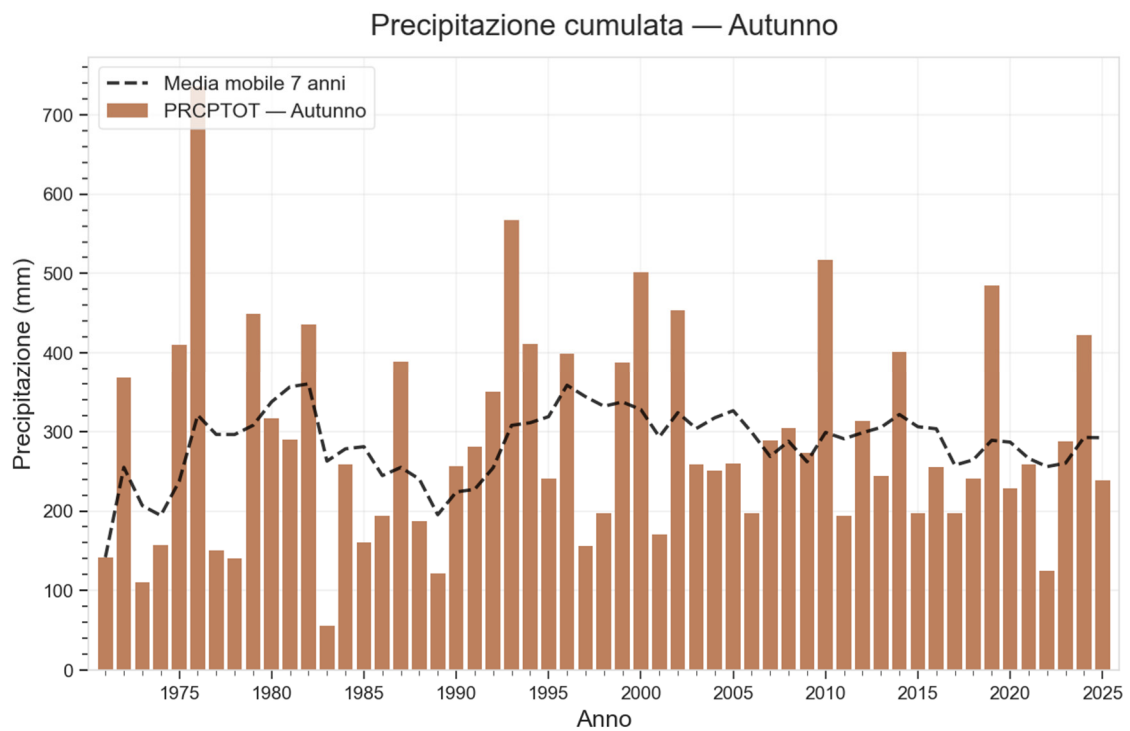


Figura 24: Precipitazione cumulata - autunno (Milano Brera)

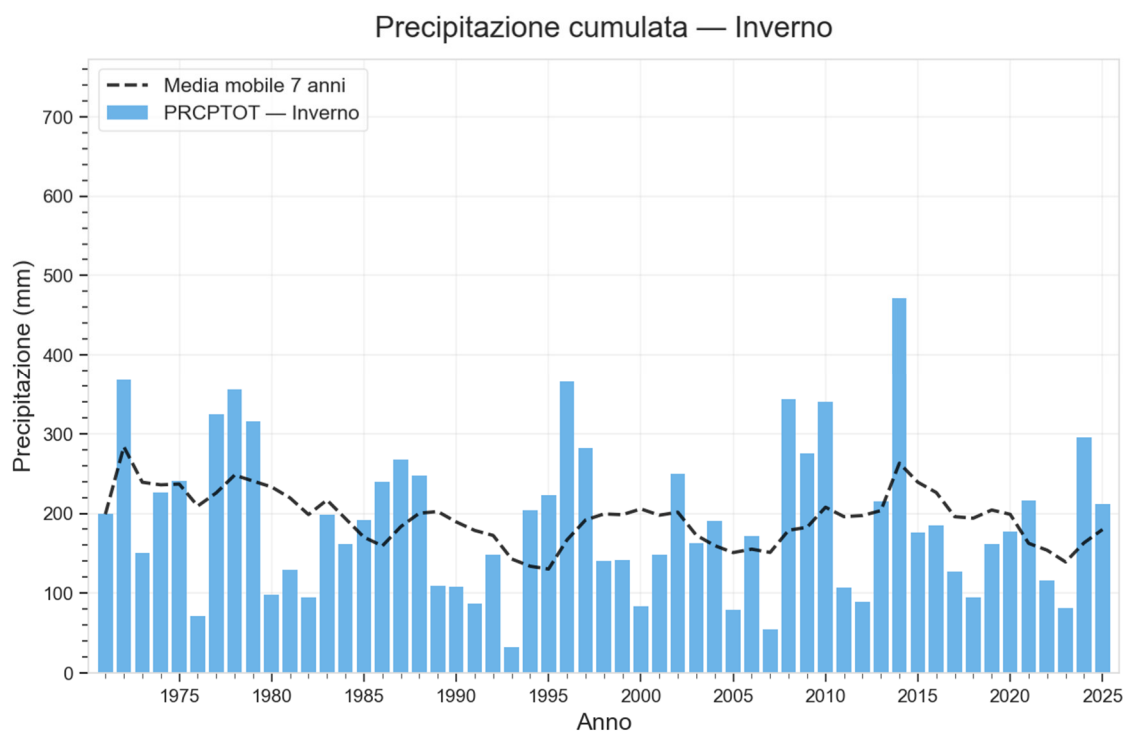


Figura 25: Precipitazione cumulata - inverno (Milano Brera)

6.2 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, in particolare la frequenza degli eventi estremi.

In particolare, sono stati indagati i giorni di precipitazione intense, definito come numero di giorni in un anno con precipitazione giornaliera superiore ai 20 mm (R20 - giorni), e la media stagionale dei massimi giornalieri di precipitazione (RX1day - mm).

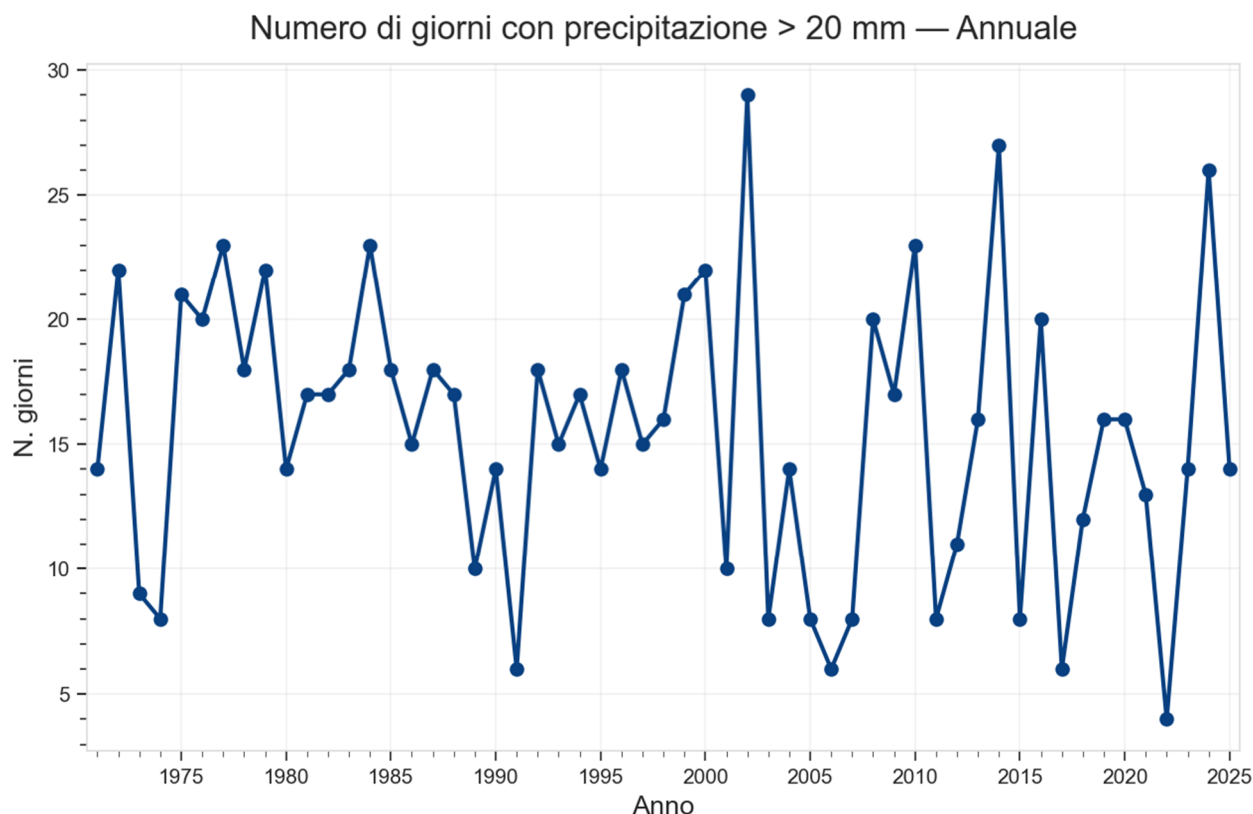


Figura 26: Numero di giorni con pioggia intensa (Milano Brera)

Il numero di giorni di pioggia intensa sta facendo registrare negli ultimi anni una maggior variabilità (Figura 26), con occorrenze anche sopra i 20 giorni anno e minimi sotto i 10 giorni anno, diversamente da quanto riscontrato in precedenza dove i valori stavano più stabilmente tra 15 e 20 giorni: negli ultimi anni si registrano picchi anche superiori a 25 giorni anno.

Si è inoltre indagato l'indicatore dei massimi giornalieri di precipitazione (RX1day - mm), proposte nelle figure seguenti.

Nel periodo analizzato non emergono trend statisticamente rilevanti per l'intensità massima giornaliera delle piogge stagionali. In generale, l'andamento di Rx1day risulta piuttosto stabile, con lievi fluttuazioni negative che non raggiungono la soglia di significatività statistica. In altre parole, le piogge più intense in un solo giorno non mostrano una tendenza chiara ad aumentare o diminuire in nessuna stagione.

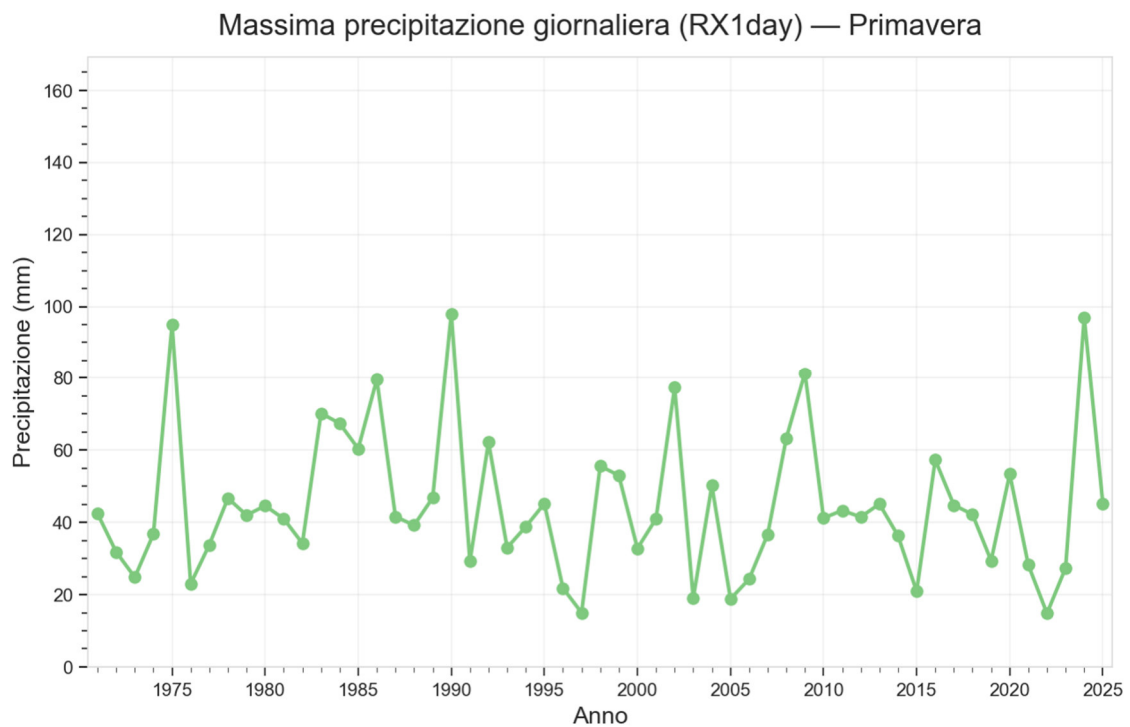


Figura 27: Massima precipitazione giornaliera - primaverile (Milano Brera)

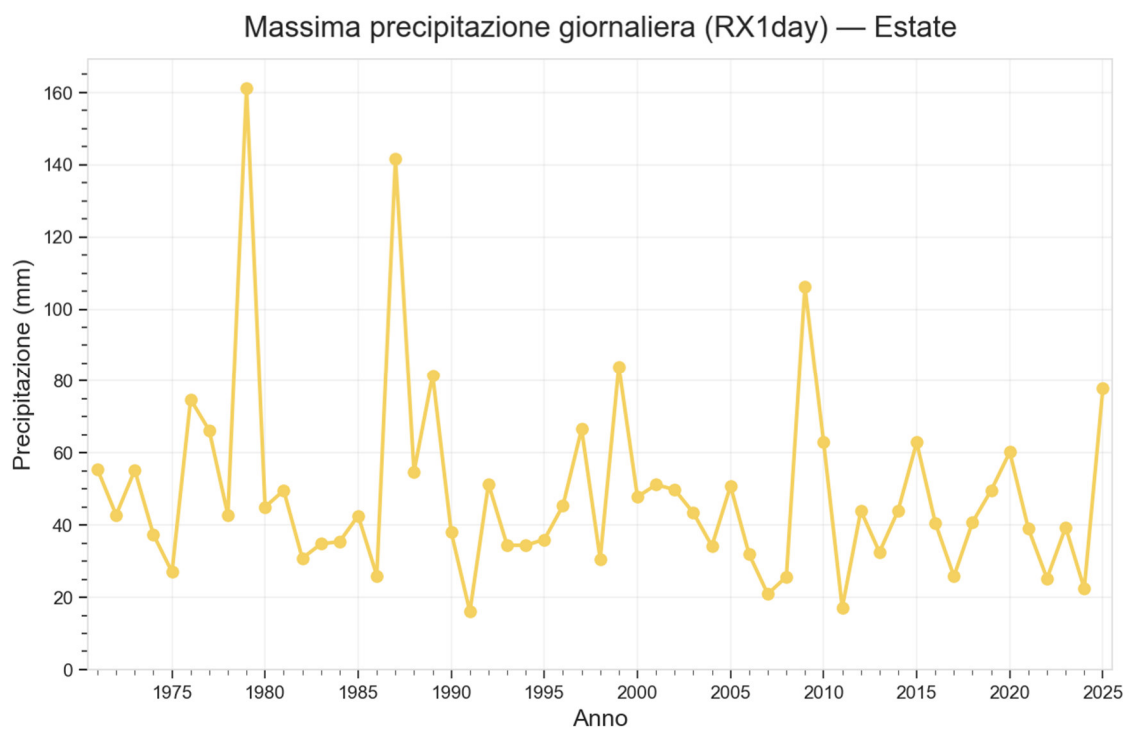


Figura 28: Massima precipitazione giornaliera - estiva (Milano Brera)

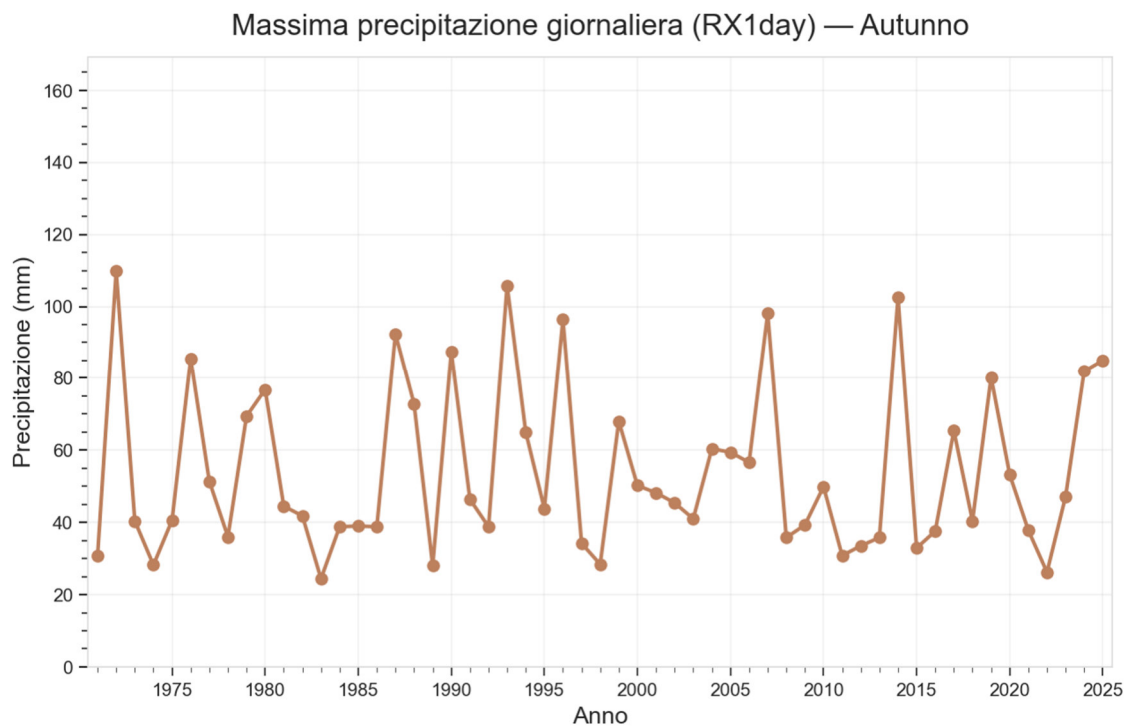


Figura 29: Massima precipitazione giornaliera - autunnale (Milano Brera)

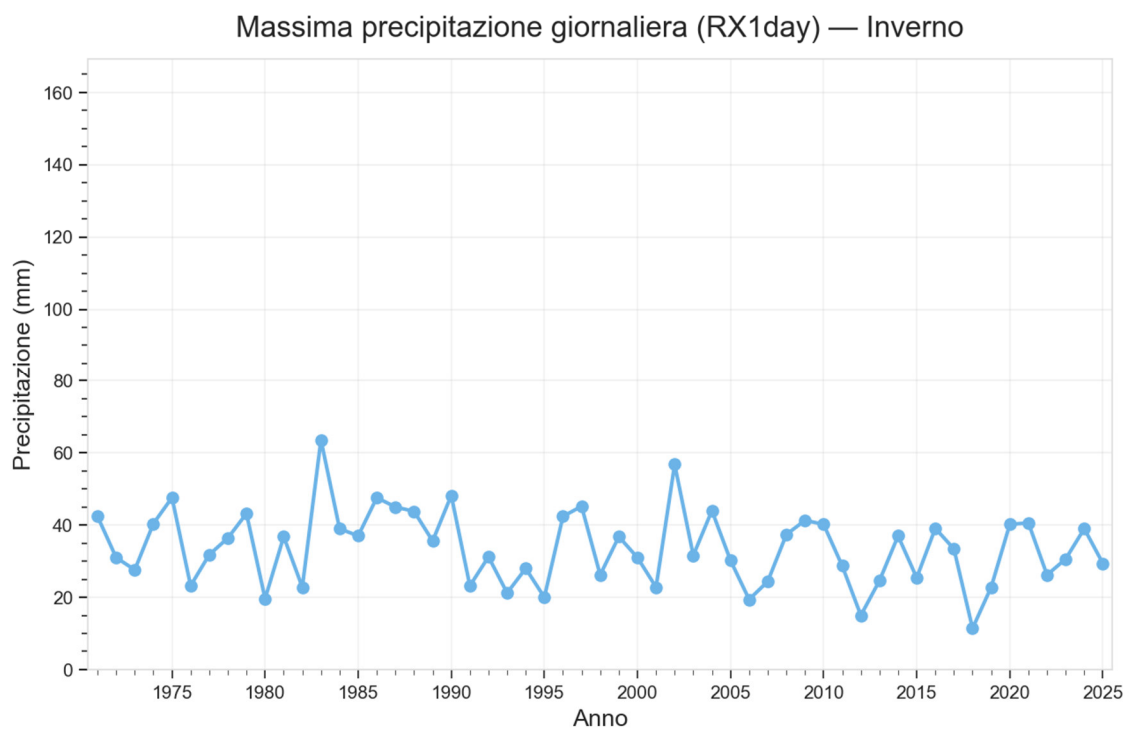


Figura 30: Massima precipitazione giornaliera- invernale (Milano Brera)

Oltre agli indicatori meteo climatologici classici si propone di seguito una visualizzazione degli eventi piovosi occorsi negli ultimi 20 anni riferiti alla stazione in Lambrate. Si sono utilizzati questi dati poiché in questa stazione è presente un sensore per la pioggia con dettaglio multiorario (ogni

dieci minuti) con una serie storica di dati disponibili più profonda rispetto alla stazione di Milano Brera.

La visualizzazione include tutti gli eventi con pioggia cumulata superiore ai 20 mm, con colorazione differente in base alla stagione e ampiezza della bolla inversamente proporzionale alla durata (ovvero bolle più grandi indicano un evento più breve nel tempo). In questo caso, l'evento di pioggia è definito come la pioggia cumulata dall'inizio dell'evento fino al momento in cui non c'è stata più pioggia per almeno 6 ore: questa analisi permette di comprendere meglio i fenomeni piovosi, "seguendone" l'evoluzione anche su più giorni.

Allo stato attuale non si evidenziano trend particolari in atto; tuttavia, la visualizzazione può essere di ausilio per comprendere le eventuali criticità dei singoli eventi.

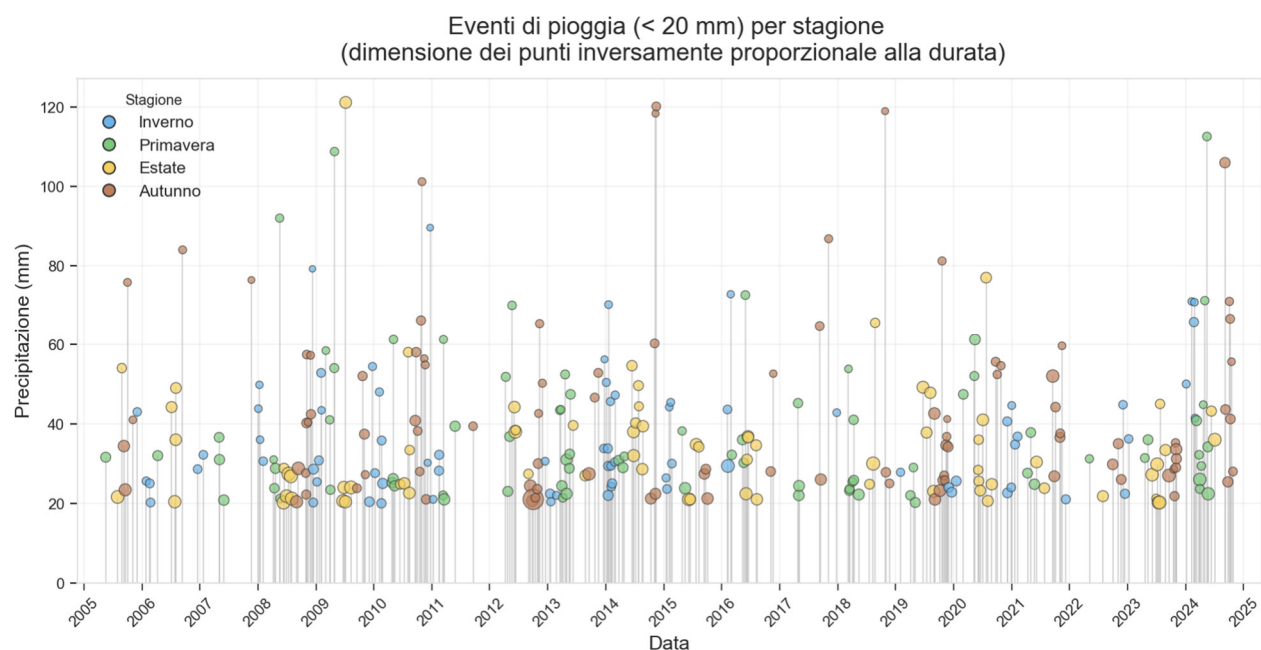


Figura 31: Rappresentazione degli eventi piovosi (>20 mm) (Milano Lambrate)

6.3 Siccità e stress idrico

Per l'analisi degli eventi di siccità si è indagato il numero massimo di giorni consecutivi senza pioggia (CDD). Tale indicatore è utile per analizzare la persistenza della siccità, gli impatti agricoli o idrici in un'area o stress per gli ecosistemi.

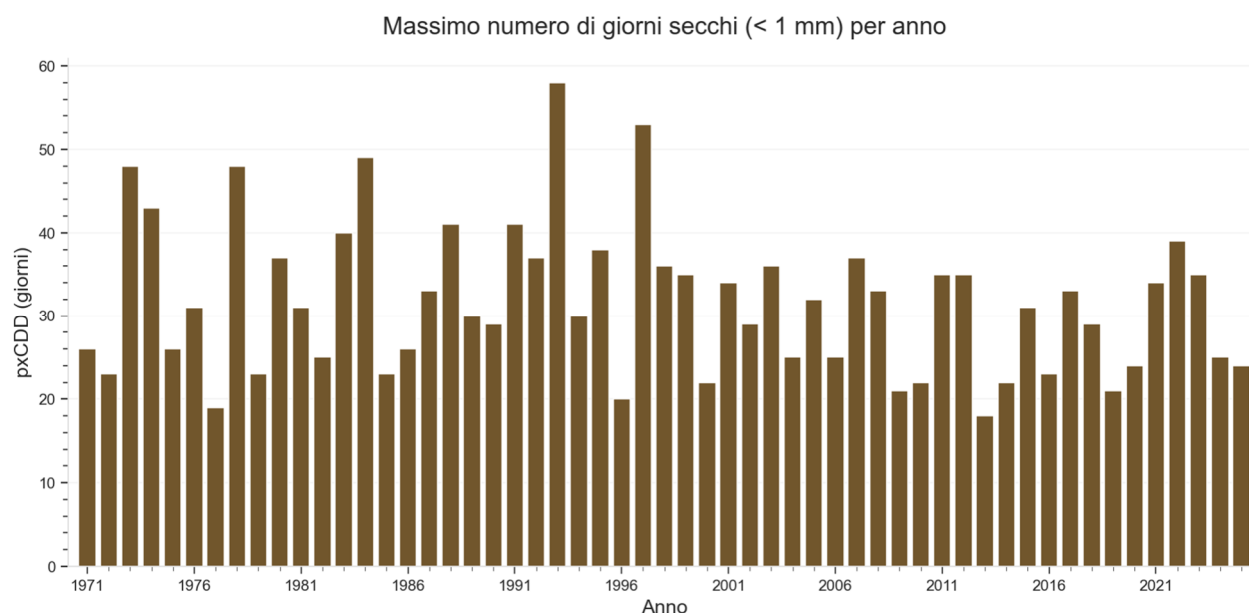


Figura 32: Numero massimo giorni secchi consecutivi (Milano Brera)

Rispetto a questo indicatore, non appare evidente una specifica tendenza (Figura 32), la lunghezza massima delle sequenze secche non mostra un trend robusto nel periodo analizzato: le variazioni anno per anno rientrano nella variabilità naturale della serie.

Di seguito si riporta l'analisi per stagione meteorologica (Figura 33). Analogamente all'analisi annuale, non si evincono trend statisticamente significativi.

Massimo numero di giorni secchi (< 1 mm) - Analisi stagionale



Figura 33: Numero massimo giorni secchi consecutivi (Milano Brera)

Poiché la siccità è un fenomeno complesso che non può essere descritto semplicemente con il numero di giorni consecutivi senza pioggia, tra gli indicatori climatologici si utilizza lo **Standardized Precipitation Index (SPI)**. Questo indicatore è stato sviluppato per valutare le anomalie delle precipitazioni rispetto alla media storica in una determinata regione e su differenti scale temporali. A differenza del PXCDD, che fornisce solo una misura della durata di un periodo secco, l'SPI permette di determinare quanto un periodo sia più secco (o più piovoso) rispetto alla norma climatologica, rendendolo particolarmente utile per l'analisi dei trend a lungo termine.

Si è pertanto elaborato l'indicatore SPI con riferimento a 3 e 6 mesi.

L'**SPI-3** è un indicatore a breve termine che riflette le anomalie delle precipitazioni su un intervallo di tre mesi. È particolarmente utile per monitorare la siccità meteorologica e i suoi effetti immediati sull'agricoltura e sulla vegetazione. Un valore negativo indica condizioni più secche rispetto alla media stagionale, con possibili impatti su colture sensibili alla disponibilità idrica, mentre un valore positivo suggerisce precipitazioni superiori alla norma.

L'**SPI-6**, invece, analizza l'andamento delle precipitazioni su un periodo più lungo, offrendo una visione della siccità agricola e degli effetti sulla disponibilità di risorse idriche superficiali, come fiumi e laghi. Questo indicatore è utile per comprendere le tendenze stagionali e valutare l'accumulo o la carenza di pioggia nel corso di più mesi, permettendo una migliore gestione dell'irrigazione e delle risorse idriche.

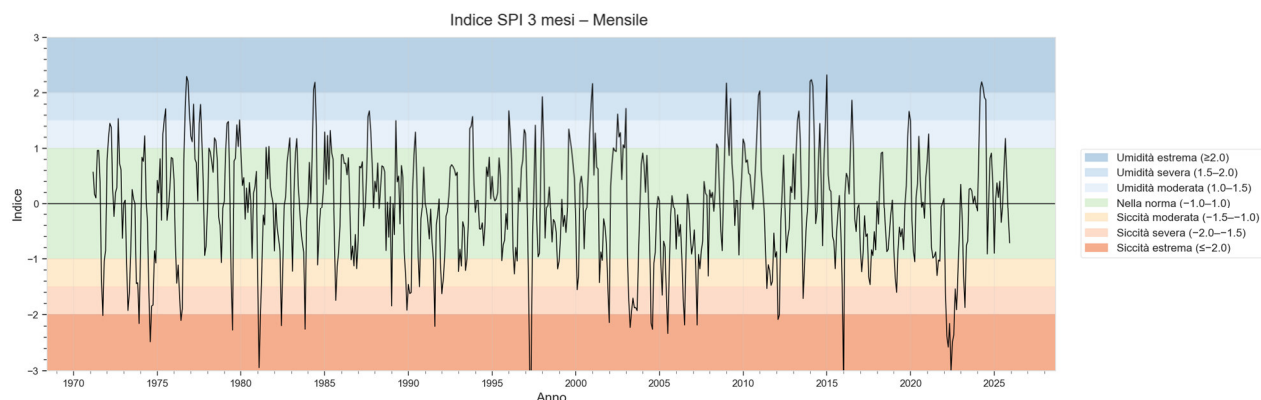


Figura 34: SPI a 3 mesi (Milano Brera)

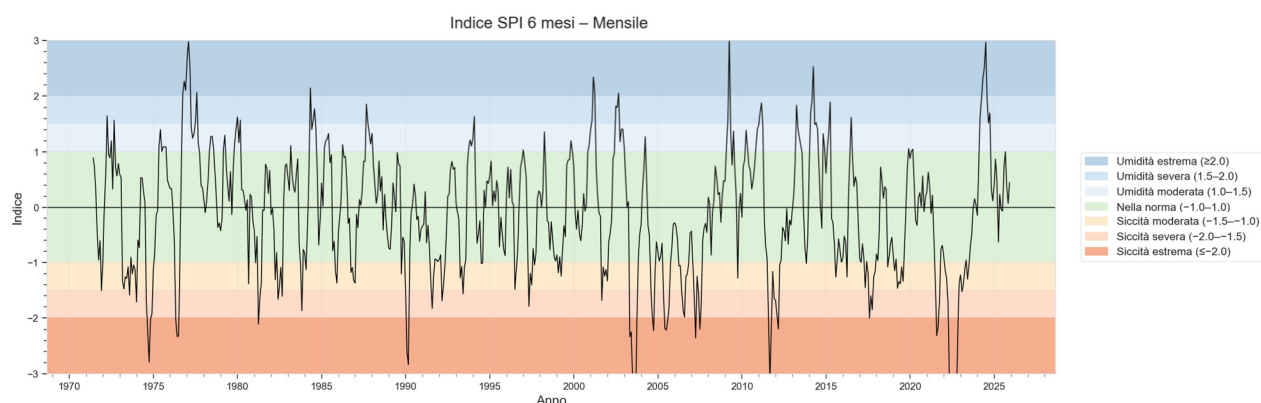


Figura 35: SPI a 6 mesi (Milano Brera)

Dall'analisi, dagli anni '70 agli anni '90, si osservano oscillazioni più equilibrate tra periodi umidi e secchi, con numerosi picchi positivi e negativi. A partire dagli anni 2000, si vede un aumento dell'ampiezza (picchi più marcati), ad esempio con periodi di secco molto intenso (2022) seguiti da umido molto intenso (2023-24) (Figura 35).

Si è approfondita l'analisi utilizzando anche l'indicatore SPEI (**Standardized Precipitation and Evapotranspiration Index**) che è un indicatore climatico che estende il concetto dello SPI, includendo non solo le precipitazioni ma anche l'evapotraspirazione potenziale (PET), che lo rende particolarmente utile per valutare la siccità in un contesto di cambiamento climatico, dove l'aumento delle temperature può intensificare la perdita di umidità dal suolo e dalla vegetazione⁸.

In questo caso è stato elaborato l'indicatore a 6 e a 12 mesi.

Nell'ambito del presente studio si sono adottate le indicazioni della World Meteorological Organization (WMO) per la classificazione delle fasce di siccità e umidità, al fine di garantire la coerenza con gli standard internazionali nella valutazione delle condizioni climatiche, classificando i valori di SPI o SPEI in categorie di siccità o umidità secondo soglie standard che facilitano il confronto tra periodi e regioni.

⁸ Nell'ambito del presente studio per il calcolo dell'indice SPIE è stata utilizzata la formula di Hargreaves-Samani. Questo metodo è generalmente considerato più adatto quando si dispone solo di temperature e precipitazioni perché, oltre alla temperatura media, utilizza anche l'escursione termica giornaliera e la radiazione solare extraterrestre, fornendo una stima della PET più fisicamente realistica e meno distorta sotto variazioni climatiche.

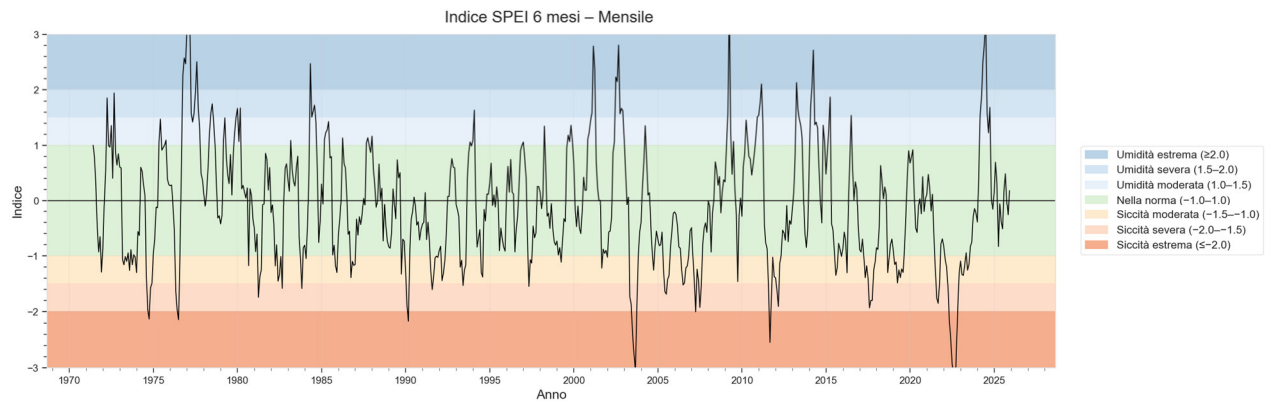


Figura 36: SPEI a 6 mesi (Milano Brera)

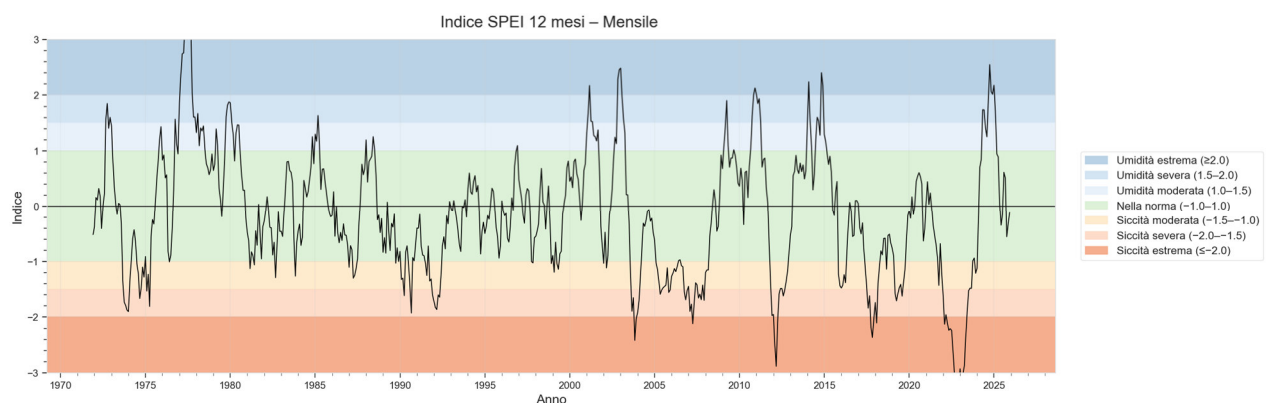


Figura 37: SPEI a 12 mesi (Milano Brera)

Il grafico SPEI-12 (Figura 37) conferma un aumento dell'intensità delle siccità negli ultimi decenni, suggerendo che il cambiamento climatico non sta solo riducendo le piogge, ma sta anche aumentando la velocità con cui l'acqua evapora dal suolo e viene traspirata dalla vegetazione. Questo porta a condizioni di ridotta umidità del terreno anche in assenza di significative variazioni nelle precipitazioni, rendendo il fenomeno della siccità più estremo e duraturo.

7 ALTRI PARAMETRI CLIMATICI

7.1 Vento

Per quanto concerne il vento, le stazioni meteo presenti rilevano e archiviano la velocità media del vento, la direzione orizzontale e – recentemente – le raffiche di vento intese come velocità massima del vento registrato.

Dal punto di vista climatico, la Pianura Padana è un'area poco ventosa. La presenza di catene montuose su tre lati, a nord e a ovest le Alpi, a sud l'Appennino, limita la circolazione del vento e il ricambio di masse d'aria, al contrario di quello che avviene su gran parte dell'Europa e, senza andare troppo lontano, sull'Italia Centro-Meridionale. È scientificamente più corretto parlare di Valle Padana, e come in tutte le valli la circolazione del vento è più tipicamente di brezza, diurna e notturna, con velocità medie in prevalenza basse. In questo regime periodico di venti deboli, le eccezioni sono di frequente rappresentate dal transito di temporali intensi e, come specificato anche di seguito, dal passaggio di perturbazioni fredde che soprattutto in inverno originano il foehn, vento burrascoso che scende dalle Alpi e si incanala lungo le valli prealpine, fino a sfociare sulla pianura lombarda occidentale. Dato il carattere molto locale di questa tipologia di eventi, risulta complicata e spesso poco significativa la ricerca di tendenze climatiche, anche in presenza di una rete meteorologica molto densa come quella di ARPA.

Un possibile approccio al problema è rappresentato dal monitoraggio del numero degli eventi appena menzionati, sui quali non esiste una letteratura scientifica consolidata. È possibile, tuttavia, affermare – ed è stato provato - che in un contesto di aumento delle temperature è maggiormente probabile, in determinate condizioni, lo sviluppo di temporali forti; per gli eventi di foehn l'andamento sembra essere ciclico, per esempio negli ultimi anni abbiamo registrato un alto numero di eventi tra il 2019 e il 2022, seguito da anni con pochi e al più moderati eventi fino a oggi.

Nell'ambito del presente studio si sono pertanto elaborati i dati relativi alle stazioni presenti in Milano o che posso caratterizzare il territorio, con un'analisi separata per il periodo caldo (da maggio a ottobre) rispetto al periodo freddo (da novembre ad aprile), poiché contraddistinti tipicamente e come già descritto da fenomeni ventosi differenti: nel periodo caldo sono più probabili eventi ventosi legati a fenomeni temporaleschi, mentre nel periodo freddo gli eventi più importanti derivano dal foehn, che impatta significativamente il microclima urbano milanese attraverso rapidi cambiamenti delle condizioni atmosferiche. In generale in ambiente urbano, le forti raffiche possono causare caduta di alberi e danni alle strutture, specialmente in combinazione con eventi di precipitazione intensa.

Le stazioni di Milano analizzate sono Brera, Lambrate, via Juvara, viale Marche oltre a Rho, caratterizzante l'area nord-ovest.

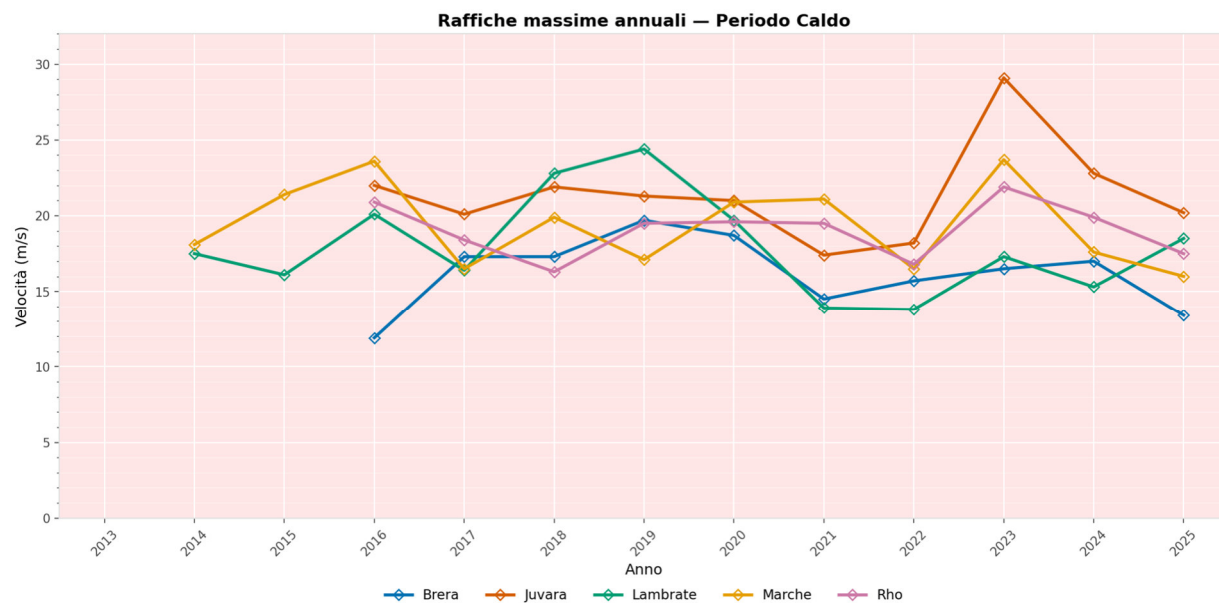


Figura 38: Valori annuali massimi di velocità massima (raffica) - periodo caldo

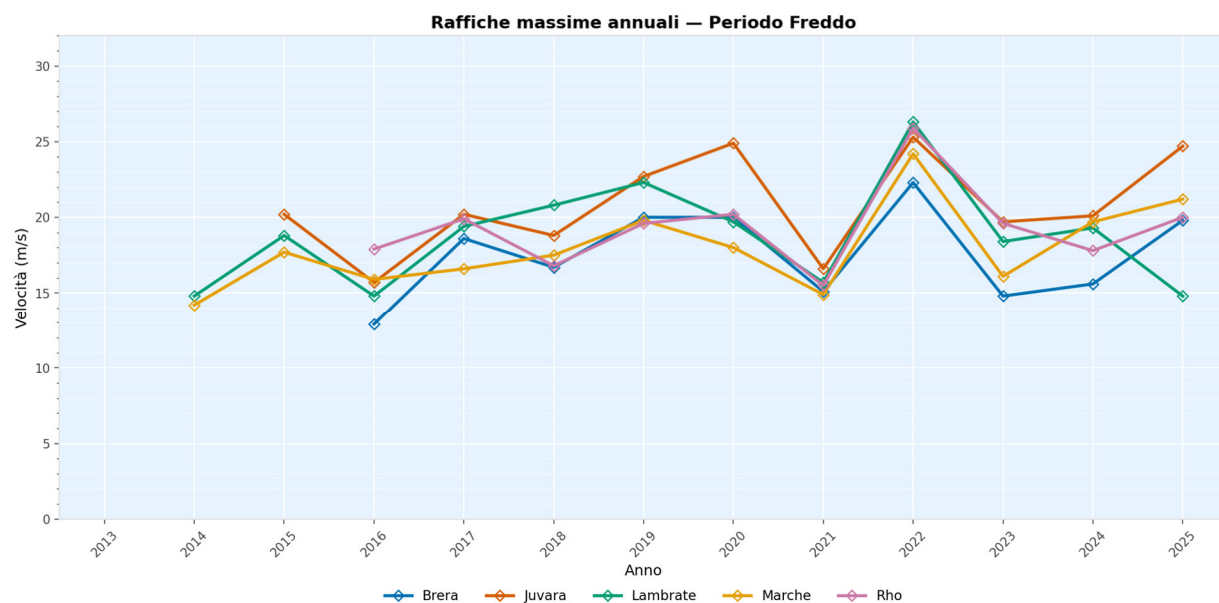


Figura 39: Valori annuali massimi di velocità massima (raffica) - periodo freddo

Di seguito si riportano invece i valori massimi (raffiche) registrate nei vari eventi ventosi, tra cui spiccano l'evento di febbraio 2022 e del 25 luglio 2023.

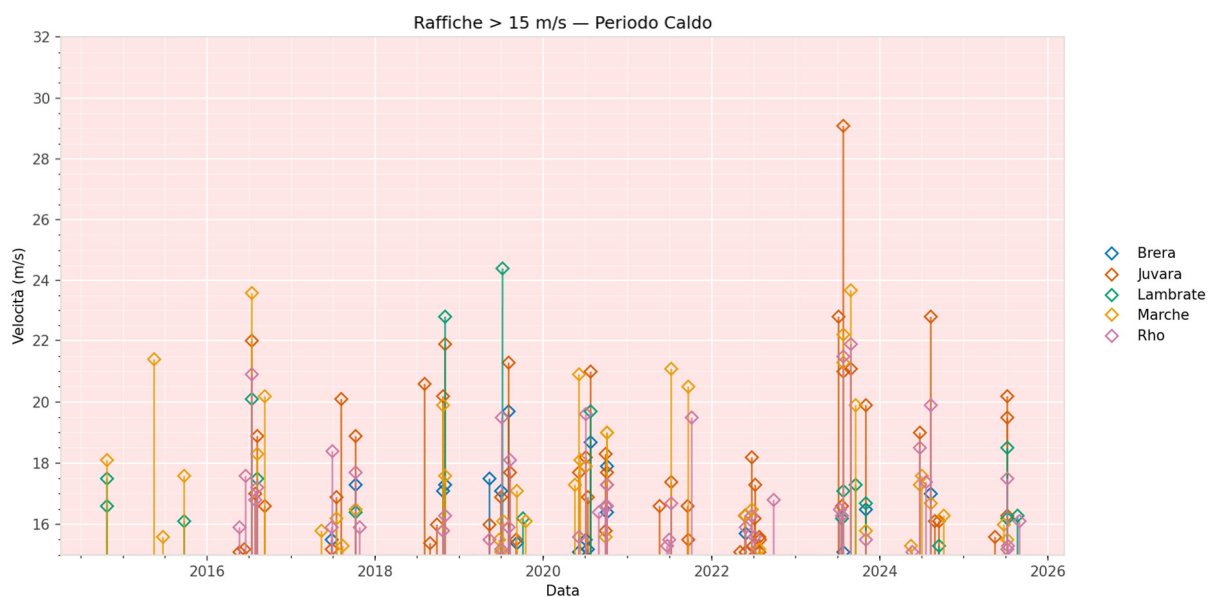


Figura 40: Valori massimi di velocità del vento (raffiche) - periodo caldo

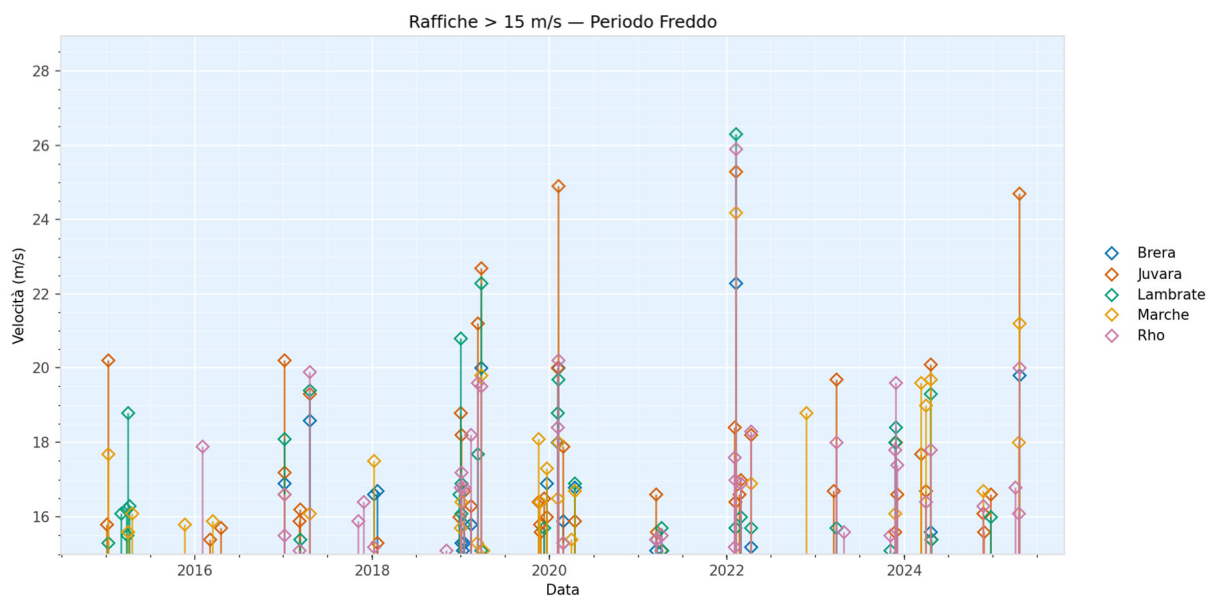


Figura 41: Valori massimi di velocità del vento (raffiche) - periodo freddo

Si è infine elaborato il numero di ore di superamento del valore soglia di 6 m/s per ogni stazione, per verificare se siano presenti o evidenti trend in corso. Nei grafici seguenti (Figura 42 e Figura 43) sono rappresentati i valori dal 2002 (primo anno di disponibilità dei dati in Lambrate): per le diverse stazioni, laddove non siano disponibili dati per quell'anno è riportato sull'asse delle x un simbolo che attesta la mancanza di dati.

Dai dati attuali non emergono particolari andamenti statisticamente significativi.

PROFILO CLIMATICO LOCALE PER LA CITTA' DI MILANO

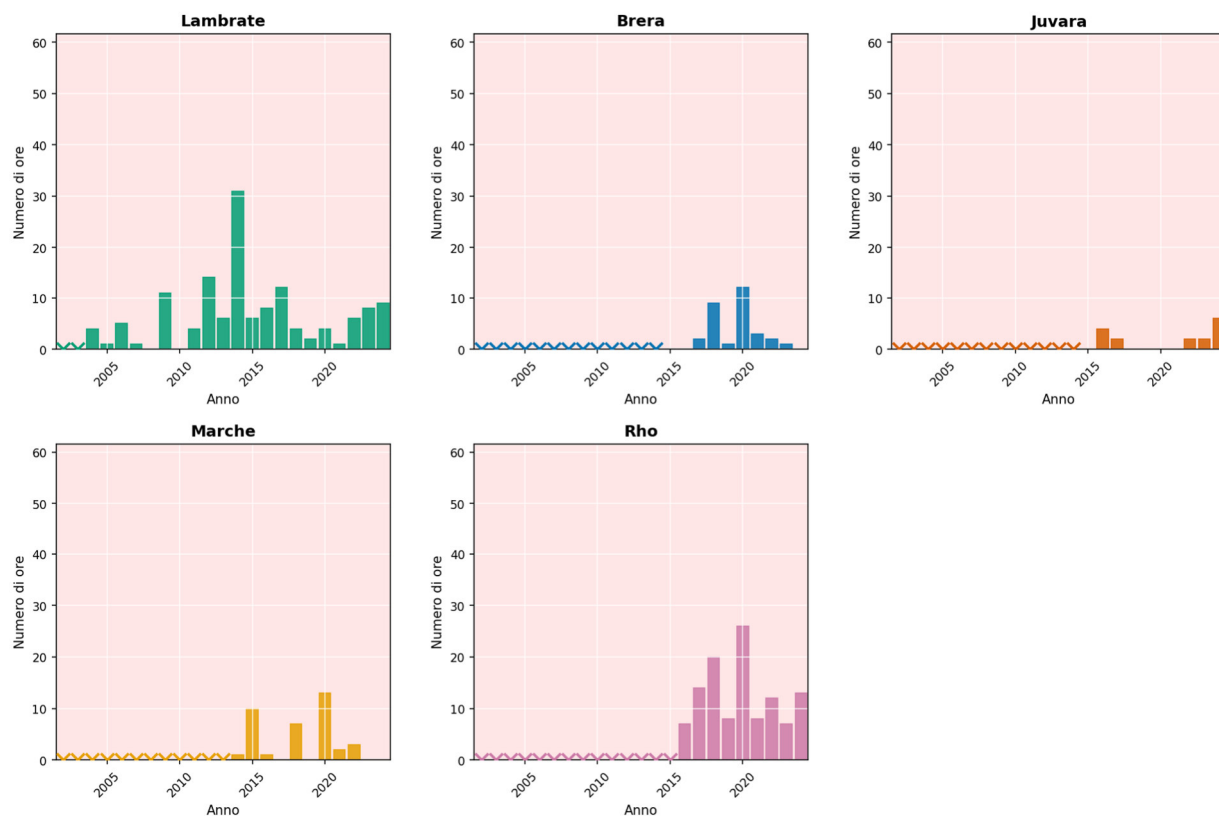


Figura 42: Numero ore/anno di superamento del valore medio di velocità del vento di 6 m/s - periodo caldo

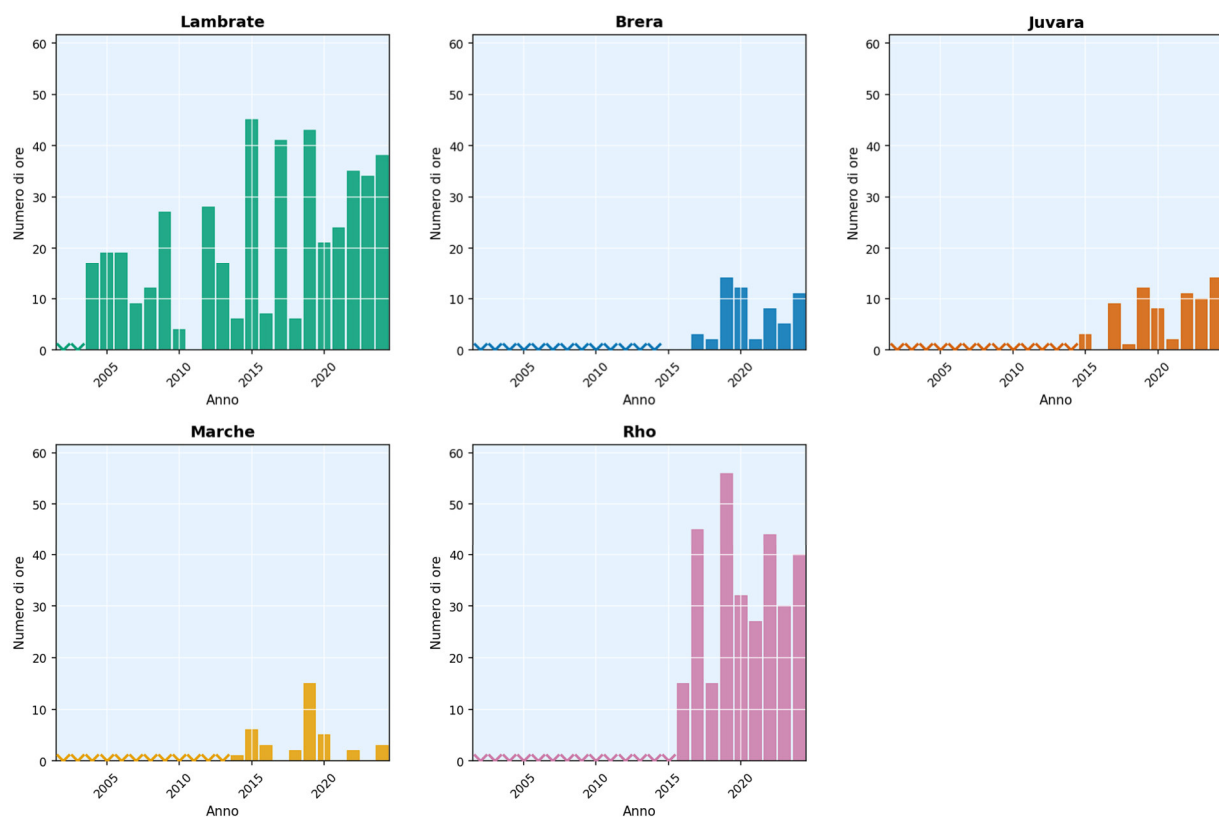


Figura 43: Numero ore/anno di superamento del valore medio di velocità del vento di 6 m/s - periodo freddo

In generale, sul tema diversi studi (xx) indicano che il cambiamento climatico sta amplificando la frequenza e l'intensità delle tempeste sia in Europa che negli Stati Uniti. Il progressivo aumento della temperatura media globale favorisce un maggiore accumulo di vapore acqueo in atmosfera, in parte anche per una maggiore evaporazione dagli oceani. Un contenuto sempre maggiore di umidità è alla base di tempeste in grado di portare potenzialmente a impatti maggiori, sia in termini di precipitazioni intense che di forza del vento. La tipologia di tempeste che più impattano l'Europa risultano, in ogni caso, molto spesso schermate dalle Alpi prima di raggiungere la Pianura Padana, limitando di fatto a pochi casi gli eventi significativi anche per la Lombardia.

Secondo le analisi svolte dal CMCC per gli scenari RCP 2.6 e RCP 4.5 con una risoluzione 12km x 12km, nel periodo che va fino al 2060 per le tempeste di vento vi è un lieve aumento, ma il segnale è affetto da notevole incertezza e necessita di approfondimenti con modelli a maggior risoluzione spazio-temporale (citato nell'Allegato 11 del Programma Regionale FESR 2021-2027 della Regione Lombardia - raro, 2023.).

In assenza di scenari, se disponibili, si possono quindi analizzare gli andamenti degli eventi estremi negli ultimi anni. Di conseguenza, la valutazione dell'esposizione appare fortemente basata su una valutazione empirica degli eventi che hanno colpito il territorio e degli effetti generati (spesso si tratta di fenomeni concentrati in un territorio limitato).

7.2 Grandine

Come già esposto per il tema riguardante le tempeste di vento, l'aumento di temperatura e umidità fornisce una crescente quantità di energia a disposizione per lo sviluppo dei temporali, e quindi anche per gli eventi di grandine, specie per quelli con chicchi di medie e grandi dimensioni. Il riscaldamento dell'atmosfera non solo alimenta l'intensità di questi temporali, ma contribuisce anche alla formazione di chicchi di grandine più grandi e distruttivi.

Uno studio recente (ii) ha rilevato che, in Europa, la grandine di medie (≥ 2 cm) e grandi dimensioni (≥ 5 cm) è più comune nell'Italia settentrionale, dove la grandine di grandi dimensioni è diventata 3 volte più probabile di quanto non lo fosse negli anni '50.

Lo studio è stato eseguito in simultanea su tutta Europa e negli Stati Uniti, evidenziando come il Nord Italia sia particolarmente interessato dall'aumento degli eventi di grandine di medie e grandi dimensioni (*hotspot*), quindi in misura maggiore rispetto ad altri settori che sperimentano usualmente questa tipologia di eventi.

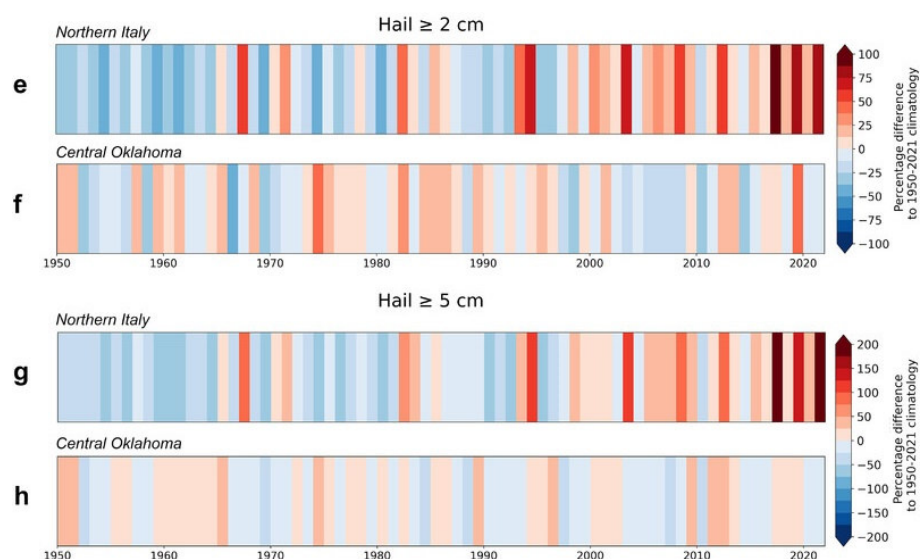


Figura 44: Serie temporale modellata della grandine nell'Italia settentrionale e nell'Oklahoma centrale (F. Battaglioli et al. 2023 - ii)

7.3 Neve

Nel Comune di Milano – ed in generale nelle stazioni di pianura – non sono presenti sensori automatiche o manuali di misura della quantità di neve riconosciute ufficialmente; pertanto, non sono disponibili dati riguardanti precipitazioni nevose.

Si è, tuttavia, implementato un algoritmo di stima delle potenziali precipitazioni nevose in base alle condizioni di precipitazione e temperature. Nel grafico seguente sono riportati, come barre impilate, i potenziali eventi nevosi relativi al periodo novembre-marzo (Figura 45).

Quanto riscontrato è stato paragonato con le informazioni dedotte dalle notizie di cronaca. Da tale confronto si deduce un grado di accuratezza sufficientemente positivo da poter ritenere che l'elaborazione possa essere affidabile per una valutazione della tendenza in corso che – analogamente a quanto riscontrato rispetto alle temperature (§ 4.4) – vede una progressiva diminuzione dei fenomeni nevosi.

Come noto, tuttavia, il trend corrente non esclude che in futuro possano verificarsi eventi “fuori scala” relativi a nevicate intense.

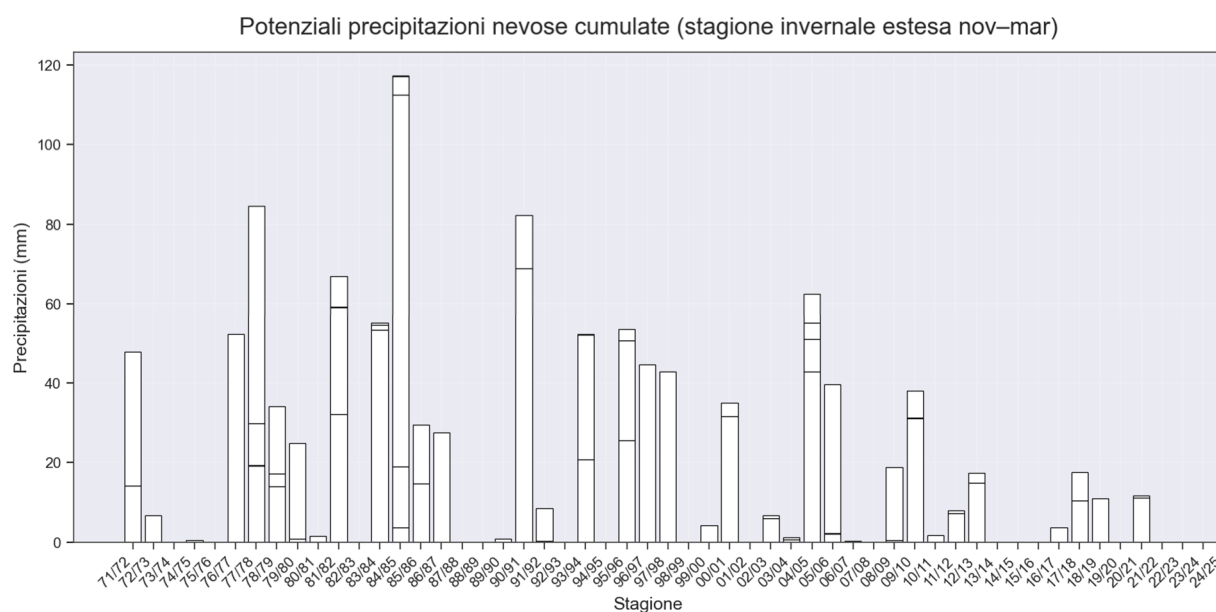


Figura 45: Potenziali precipitazioni nevose
(dedotte da misure di precipitazioni e di temperatura della stazione di Milano Brera)

8 CONCLUSIONI SULLA VARIABILITA' CLIMATICA OSSERVATA

I risultati del presente studio climatico sulla città metropolitana di Milano evidenziano i seguenti segnali climatici nel periodo **1971-2025**.

8.1 Temperatura

L'analisi effettuata ha evidenziato tendenze altamente significative di aumento della temperatura media giornaliera (Tas), massima e minima annua, comprese tra +0.54 °C/decade (Tmax) e +0.57 °C/decade (Tmin), con una media di +0.54 °C/decade.

A livello stagionale, tutte le stagioni mostrano trend significativi di riscaldamento compresi tra +0.47 °C/decade (inverno) e +0.65 °C/decade (estate).

Analizzando i dati storici della stazione di Brera, pur considerando che le metodologie e gli strumenti utilizzati a fine 1700 erano differenti da quanto in uso ora, evidenziano come l'aumento di temperatura media registrato dal periodo pre-industriale ad oggi sia già oltre i 2 °C, confermando che l'Italia, nel contesto europeo e mediterraneo, è un cosiddetto *hotspot* del cambiamento climatico, ovvero a fronte di un riscaldamento medio globale di circa 1,5 °C le nostre zone si stanno riscaldando in misura maggiore.

Con riferimento invece al solo periodo 1971-2025, analizzando i primi 30 anni e gli ultimi 30, l'aumento di temperatura registrato è di circa 1,6 °C: l'effetto dell'innalzamento della temperatura ha incominciato ad intensificarsi dopo gli anni '90 del secolo scorso.

L'aumento delle temperature porta con sé diverse conseguenze nel periodo indagato, quali:

- Il raddoppio delle cosiddette “notti tropicali”, ovvero i giorni in cui la temperatura minima non scende sotto a 20 °C
- Si registra una significativa diminuzione dei gradi giorno di riscaldamento (HDD), evidenziando una riduzione del fabbisogno energetico per il riscaldamento. Nel confronto tra periodi, si osserva un calo del 12.9% tra 1971-2000 (2407 GG) e 2001-2025 (2098 GG).
- I gradi giorno di raffrescamento mostrano un marcato aumento di +36.2 GG/decade, segnalando un incremento significativo del fabbisogno energetico per il raffrescamento. Il valore è quasi raddoppiato (+125.3%) passando da circa 94 GG nel periodo 1971-2000 a 211 GG nel periodo 2001-2025.
- Il numero di giorni con gelo (Fd) mostra una significativa diminuzione di -3.3 giorni/decade. Il valore medio è passato da 20.3 giorni/anno nel periodo 1971-2000 a 9.6 giorni/anno nel periodo 2001-2025, con una riduzione del 52% ed il numero di giorni con ghiaccio (Txice) è ormai praticamente azzerato.
- Il numero di giorni estivi con temperatura massima superiore a 25 °C (SD) mostra un incremento di +6.1 giorni/decade ed il numero di giorni estivi con temperatura massima superiore a 30 °C (SD) registra un aumento di +6.6 giorni/decade. Il valore medio è passato da 30.4 giorni/anno (1971-2000) a 50.3 giorni/anno (2001-2025), con un incremento del 65%.
- Per quanto concerne l'indice di durata dei periodi di caldo (WSDI), calcolato come numero totale di giorni in cui la temperatura massima giornaliera supera il 90° percentile del periodo climatologico di riferimento per almeno 6 giorni consecutivi, si è passati da un valore di circa 5,5 giorni/anno del periodo 1971-2000 a 28,52 giorni/anno del periodo 2001-2025, con un aumento di 5 volte: il valore è aumentato perché ora consideriamo anche le onde di calore – intese come periodo di cui son presenti temperature oltre ai valori insoliti per il periodo, possono verificarsi in primavera e autunno, non solo nella stagione estiva.

Come accennato, per tutti gli indicatori di temperatura e stress termico si conferma un deciso incremento dell'intensità del segnale di riscaldamento dopo il 1990.

8.2 Precipitazioni

La precipitazione cumulata annuale (PRCPTOT, giorni con precipitazione ≥ 1 mm) evidenzia un calo di -27.4 mm/decade, statisticamente non significativo;

La stagione estiva mostra l'unica tendenza significativa, con un marcato calo delle precipitazioni. Nel confronto tra periodi, le precipitazioni annue sono diminuite dell'8.6% passando da 1000 mm/anno (1971-2000) a 919 mm/anno (2001-2025);

Per quanto concerne invece i giorni con precipitazione intensa (R20, > 20 mm) ed il massimo valore giornaliero di precipitazione nell'anno (RX1day) non si evidenziano tendenze significative, indicando che i picchi di precipitazione estrema non hanno subito variazioni sistematiche, ma si può intravedere un aumento della variabilità interannuale dei fenomeni.

In assenza di strumentazione dedicata al rilevamento delle precipitazioni nevose, si sono indagate le condizioni meteorologiche che possono portare a precipitazione nevose. L'aumento delle temperature ha contribuito in maniera evidente a diminuire la quantità di neve al suolo in questi ultimi anni, con una tendenza verso l'assenza totale di precipitazioni nevose.

8.3 Siccità e stress idrico

Il numero massimo di giorni consecutivi senza pioggia (pxCDD) non presenta trend significativi (-1.1 giorni/decade, ns), suggerendo che non vi è una chiara tendenza all'aumento o diminuzione dei periodi siccitosi prolungati.

La combinazione di ridotte precipitazioni estive e l'aumento delle temperature indica invece un incremento dello stress idrico durante la stagione calda, con maggiore evapotraspirazione e minori apporti idrici.

Elaborazione scenari climatici futuri

9 PROIEZIONI CLIMATICHE FUTURE - QUADRO GENERALE

Milano si trova collocata sul margine superiore della Pianura Padana, in un contesto di cerniera tra il continente europeo e il bacino Mediterraneo. La presenza delle Alpi a Nord e a Ovest costituisce una barriera naturale per la circolazione atmosferica e determina situazioni climatiche locali particolari. Questa collocazione a confine tra due aree climaticamente molto diverse (Europa continentale esposta al passaggio delle perturbazioni fredde e umide e bacino Mediterraneo esposto a un progressivo inaridimento se non desertificazione) rende particolarmente complesso lo studio del cambiamento climatico atteso nel nostro territorio.

Com'è noto, i modelli climatici a scala globale hanno una risoluzione territoriale che non riesce ad esprimere le caratteristiche territoriali delle regioni montuose: con una maglia di calcolo generalmente attorno ai 50-100 km, i modelli GCM tendono a trascurare gli effetti locali, che tanta influenza hanno sul clima attuale e che, verosimilmente, ancora più rilevanza assumeranno in futuro.

Per ovviare a questa limitazione, sono stati sviluppati da tempo dei modelli a scala regionale (CORDEX) che consentono di ottenere una migliore risoluzione di calcolo, con una maglia che per il nostro territorio è di circa 12 km. Anche questi modelli, però, subiscono l'effetto di semplificazioni piuttosto rilevanti soprattutto per quanto riguarda i fenomeni atmosferici con scale spaziali e temporali piccole.

Negli ultimi anni si sono sviluppati modelli più precisi: in particolare, lo sforzo è consistito nel migliorare proprio la parte dinamica dell'atmosfera a scala più piccola, il che implica una migliore rappresentazione, ad esempio, dei fenomeni temporaleschi, che hanno particolare rilevanza nell'area milanese.

In questa direzione si è mosso il CMCC, che ha prodotto un interessante dataset di proiezioni climatiche per l'Italia che sono alla base del presente rapporto.

Ovviamente va distinta la classica previsione meteorologica prodotta dai modelli, la cui affidabilità è limitata a pochi giorni, dalla proiezione climatica che ha l'ambizione di simulare l'andamento del sistema meteorologico per interi decenni giorno per giorno (o addirittura ora per ora in alcuni casi). Va quindi compreso che i modelli climatici non sono in grado di rispondere alla domanda "Che tempo farà il 23 aprile 2071?" ma sono in grado di rispondere a domande di natura statistica, quali ad esempio "Le precipitazioni nel trentennio 2071-2100 saranno maggiori o minori di quelle attuali?". Questo tipo di informazione è proprio quella che è necessaria per valutare il trend futuro dei fenomeni e come questi potranno eventualmente presentarsi sul nostro territorio.

10 METODOLOGIA

10.1 MODELLO DI REGIONALIZZAZIONE

Le proiezioni climatiche di questo lavoro sono state ottenute utilizzando il più recente e aggiornato dataset disponibile, rilasciato nel febbraio 2025 dal Centro euro-Mediterraneo sui Cambiamenti Climatici.

La Fondazione CMCC (Centro Euro-Mediterraneo sui Cambiamenti Climatici) è uno dei più autorevoli centri di ricerca internazionale, indipendente e multidisciplinare che produce ricerca avanzata sul clima sviluppando analisi e dati multidisciplinari che combinano modellistica climatica con modellistica sugli impatti dei cambiamenti climatici e sull'economia ambientale.

In particolare, il dataset è stato realizzato con la regionalizzazione statistica (Statistical Downscaling, SD), che permette di trasformare l'informazione dei modelli climatici globali in stime adatte alla scala locale (ad esempio la città).

Il modello utilizzato è una regressione multivariata basata sulle correlazioni canoniche (CCAReg; Tomozeiu et al., 2017): collega variabili atmosferiche “a grande scala” – simulate in modo più affidabile dai modelli CMIP6 – con variabili di interesse locale (temperature minima/massima, precipitazioni), massimizzando la correlazione fra le serie temporali.

Il dataset nasce dall'ensemble dei modelli CMIP6, corretto con la tecnica Empirical Quantile Mapping usando la rianalisi CERRA come riferimento, e copre il periodo 1985-2100, e fornisce dati climatici ad alta risoluzione (~5,5 km) sull'Italia (ix).

Le proiezioni sono state analizzate nello scenario socio-economico SSP3-7.0 (“Regional Rivalry”), caratterizzato da forti rivalità regionali e limitate politiche climatiche, che comportano un riscaldamento medio-alto entro fine secolo.

Il dataset e le proiezioni sono riferiti genericamente alla città di Milano. Un confronto tra le simulazioni per il periodo storico (1985–2014) e i dati osservati dalle stazioni meteo di Milano Brera e Milano Lambrate mostra che il dataset rappresenta abbastanza bene la situazione climatica media cittadina, anche se si segnala che dopo il 2010 le temperature medie misurate a Milano Brera risultano leggermente più alte rispetto a quelle simulate.

È importante sottolineare che le proiezioni climatiche non vanno interpretate come un prolungamento diretto e puntuale dei dati osservati: i valori stimati per il futuro non sono “in continuità” perfetta con i dati reali della stazione meteo. Infatti, pur essendo calibrati sui dati storici, i modelli hanno una loro coerenza interna e una propria risoluzione spaziale e temporale, che possono differire dalla serie di misura locale.

L'obiettivo di queste proiezioni è quindi individuare l'andamento di lungo periodo (trend) e valutare la direzione e l'intensità dei cambiamenti climatici attesi, non confrontare i valori assoluti punto per punto con le osservazioni.

Il confronto con i dati meteo storici rimane comunque utile per contestualizzare i risultati, fornendo un riferimento per interpretare la portata dei cambiamenti attesi e per comunicare in modo chiaro le differenze rispetto al clima che abbiamo conosciuto finora.

APPROFONDIMENTO METODOLOGICO

Fino a qualche anno fa, la maggior parte degli studi climatici si basava sui cosiddetti RCP (Representative Concentration Pathways), cioè scenari che indicavano quanta energia in più sarebbe rimasta intrappolata nell'atmosfera a causa dei gas serra, ma senza dire molto su come la società ci sarebbe arrivata. Erano utili per fare confronti globali, ma spesso non raccontavano in modo realistico quali cambiamenti economici, politici e sociali potevano accompagnare quelle emissioni.

Con l'ultimo ciclo di studi internazionali, l'IPCC ha introdotto gli SSP (Shared Socio-economic Pathways), che oltre alla quantità di emissioni descrivono anche i diversi percorsi possibili di sviluppo della società: quanta cooperazione internazionale ci sarà, quanto investiranno i Paesi in innovazione o energia pulita, quanto sarà facile adattarsi ai cambiamenti climatici.

Usare gli scenari SSP in uno studio a scala locale, come in questo lavoro, significa quindi avere proiezioni climatiche più vicine alla realtà e più utili per pianificare azioni concrete. È un approccio più completo e coerente con le dinamiche socio-economiche di oggi e di domani oltre ad essere allineato alla letteratura scientifica più recente: gli SSP, infatti, hanno sostituito gli RCP come riferimento principale per gli studi sul clima, anche nell'ottica di revisioni ed aggiornamenti futuri.

Tra i diversi scenari disponibili oggi, abbiamo scelto di basare questo studio sullo scenario SSP3-7.0.

Rispetto agli scenari usati in passato (i vecchi RCP), l'SSP3-7.0 è una via di mezzo tra l'RCP4.5 (uno scenario intermedio) e l'RCP8.5 (più estremo), spesso utilizzati negli studi climatici fino a pochi anni fa.

Optare per un livello intermedio come il 7.0 semplifica la lettura dei risultati perché fornisce un quadro cautelativo ma non estremo, più adatto alle applicazioni pratiche legate alla crescente esigenza di valutazioni climatiche per piani e progetti.

Inoltre, è importante ricordare che fino al 2050 gli scenari climatici sono sostanzialmente simili tra loro, perché le differenze maggiori tra uno scenario e l'altro si manifestano nella seconda metà del secolo.

Per questo motivo è più prudente utilizzare uno scenario come l'SSP3-7.0 quando si tratta di pianificare interventi o valutare l'impatto dei cambiamenti climatici su infrastrutture critiche – che devono durare nel tempo e resistere anche a condizioni più severe – poiché offre una proiezione realistica ma sufficientemente cautelativa. In questo modo si supportano decisioni più robuste e adattabili ai possibili sviluppi futuri.

Infine, le analisi presentate in questo studio non si basano su un singolo modello climatico, ma sull'**ensemble**, ovvero la media dei risultati prodotti da 9 diversi modelli. I modelli climatici sono strumenti numerici che simulano come si comporta il sistema climatico terrestre: ogni centro di ricerca sviluppa il proprio, con caratteristiche e parametri leggermente diversi.

Proprio perché ogni modello ha i suoi punti di forza e di debolezza, lavorare con un insieme di modelli e calcolarne la media permette di ridurre l'incertezza legata ad eventuali anomalie o errori di un singolo modello. In questo modo si ottiene una proiezione più stabile e realistica, che tiene conto di una gamma più ampia di possibilità.

Questo approccio risulta particolarmente utile per la finalità di questo studio, dove la complessità del territorio e del clima rende ancora più importante avere una stima robusta e affidabile. Utilizzare l'ensemble significa quindi fornire un quadro più solido e credibile, utile per chi deve pianificare interventi, progettare infrastrutture o definire strategie di adattamento ai cambiamenti climatici.

11 PROIEZIONI FUTURE DELLA TEMPERATURA

11.1 Cambiamento della temperatura dell'aria

L'aumento della **temperatura media dell'aria** è uno degli effetti più evidenti e misurabili del cambiamento climatico in atto. La temperatura rappresenta un indicatore sintetico che condensa numerosi processi atmosferici e terrestri, influenzando in modo diretto la vivibilità delle città, la disponibilità di risorse idriche, l'agricoltura e la salute umana. Comprendere come evolverà la temperatura su scala locale è essenziale per progettare interventi di adattamento coerenti con le trasformazioni che si stanno già osservando.

Nei grafici seguenti viene mostrato l'andamento previsto delle temperature annue a Milano da qui alla fine del secolo, basato su un ensemble di modelli climatici regionalizzati. La linea colorata rappresenta il valore medio stimato, mentre la fascia grigia evidenzia il range di incertezza derivante dalle diverse simulazioni utilizzate per la costruzione dell'ensemble.

Rispetto alla media storica del periodo 1985-2014, pari a circa 14,3 °C, si osserva un progressivo incremento che porta la temperatura media annua a superare i 18-19 °C entro il 2100, con oscillazioni che riflettono la variabilità climatica naturale e le differenze tra i modelli (Figura 46).

Analogamente la temperatura minima media annuale si attesterà attorno ai 15 °C verso fine secolo (Figura 48), mentre la temperatura massima media annuale raggiungerà circa 23 °C (Figura 47).

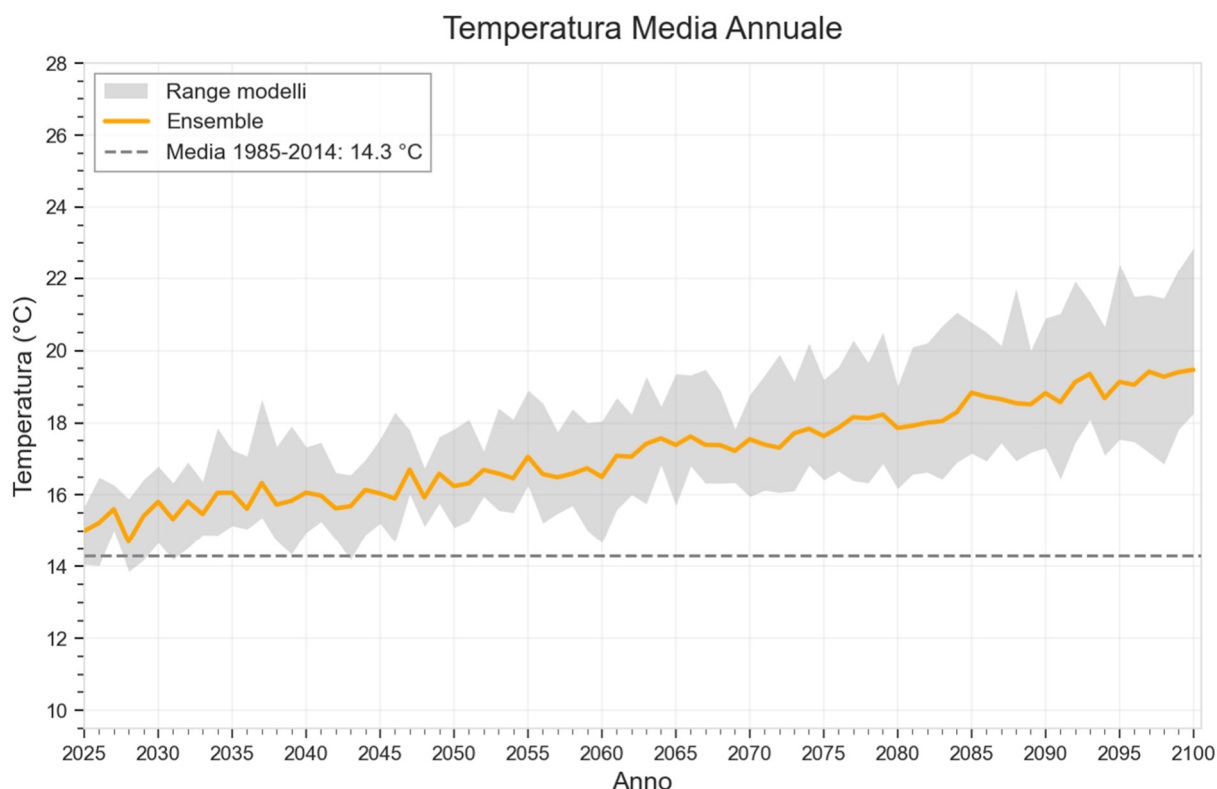


Figura 46: Proiezione incremento temperatura media annuale (Milano - CMIP6 3 7.0)

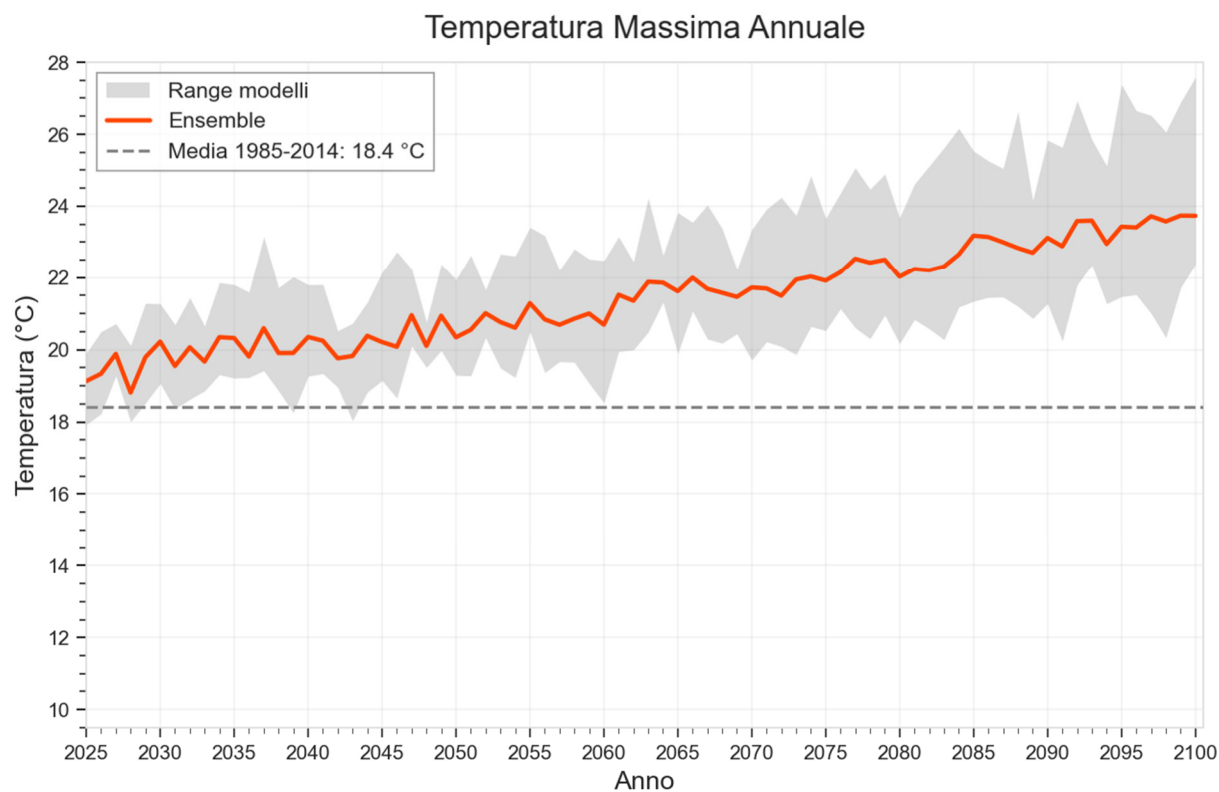


Figura 47: Proiezione incremento temperatura massima media annuale (Milano - CMIP6 3 7.0)

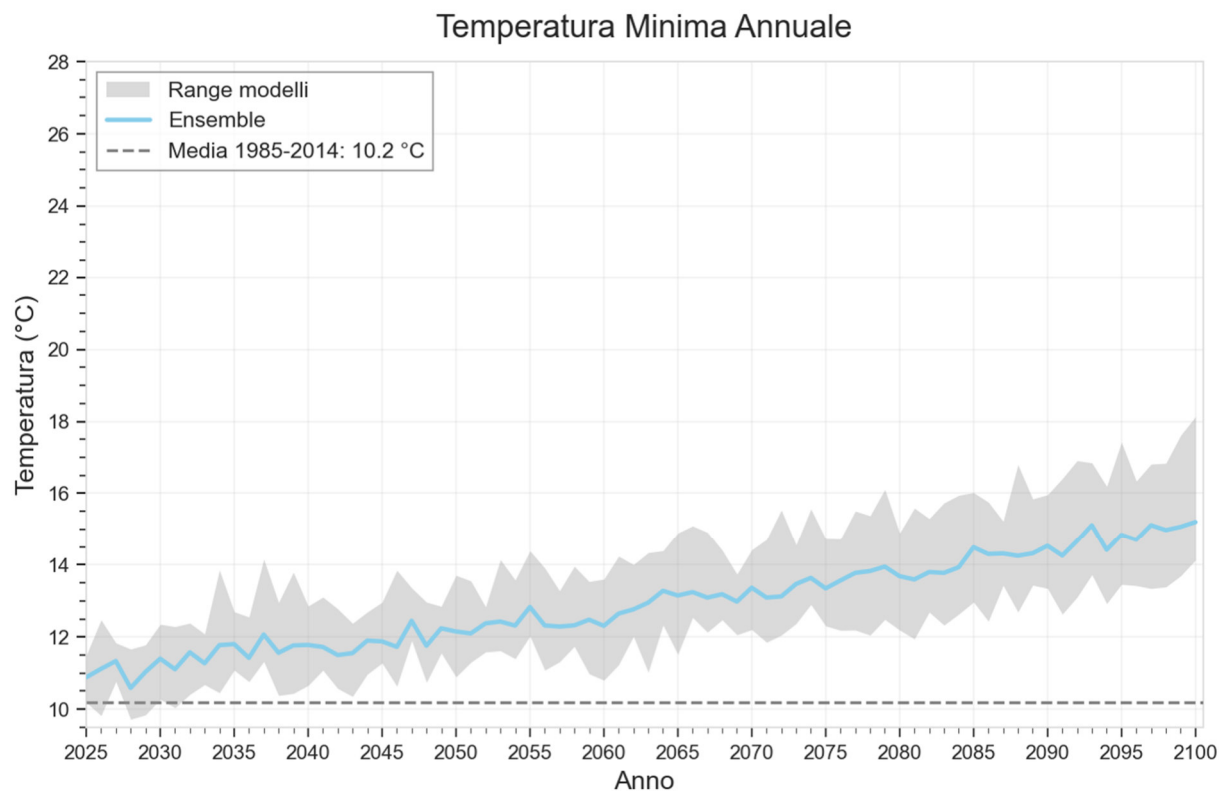


Figura 48: Proiezione incremento temperatura minima media annuale (Milano - CMIP6 3 7.0)

Si propongono inoltre alcune visualizzazioni di più facile lettura riguardo alle anomalie di temperature previste.

In particolare, nella Figura 51 si evidenzia come l'aumento medio delle temperature sarà più marcato nel periodo estivo, con le conseguenze che saranno approfondite nei capitoli seguenti.

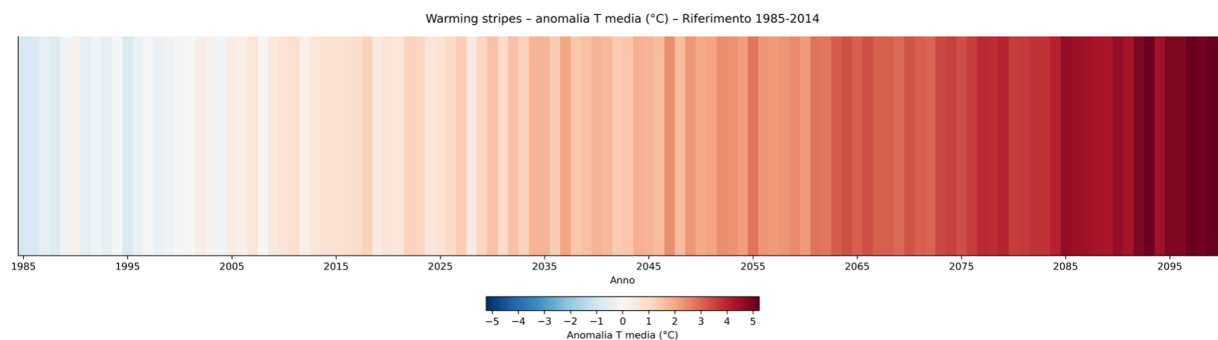


Figura 49: Variazioni della temperatura media annuale rispetto al periodo 1985-2014 (Milano - CMIP6 3 7.0)

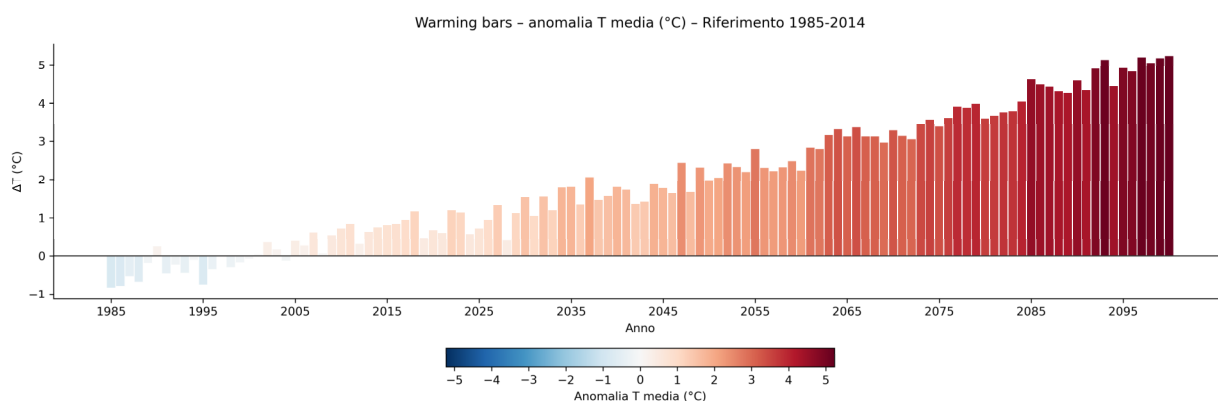


Figura 50: Variazioni della temperatura media annuale rispetto al periodo 1985-2014 (Milano - CMIP6 3 7.0)

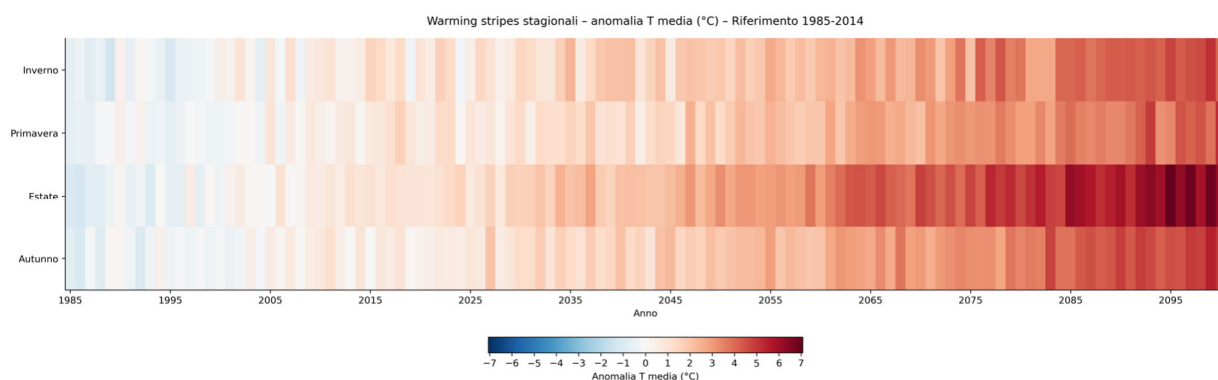


Figura 51: Variazioni della temperatura media stagionale rispetto al periodo 1985-2014 (Milano - CMIP6 3 7.0)

11.2 Gradi giorno di riscaldamento

I Gradi Giorno di Riscaldamento (in inglese Heating Degree Days, HDD) sono un parametro tecnico utile per capire quanta energia serve per riscaldare un edificio durante la stagione fredda. In pratica, i Gradi Giorno misurano quanto la temperatura esterna si discosta da un livello di comfort stabilito: in Italia, questo valore convenzionale è fissato a 20 °C. Questo permette di stimare in modo semplice la domanda teorica di riscaldamento: più freddo fa fuori, maggiore sarà il valore dei Gradi Giorno e, di conseguenza, maggiore sarà l'energia necessaria per mantenere gli ambienti interni confortevoli.

Secondo la classificazione prevista dal D.P.R. 26 agosto 1993, n. 412, Milano rientra nella zona climatica E. Per questa zona, il valore di riferimento è di 2.404 Gradi Giorno. Questo dato era stato fissato sulla base di condizioni climatiche storiche, quando gli inverni erano più rigidi e prolungati.

Le proiezioni climatiche stimano che, entro la fine del secolo, i Gradi Giorno per Milano potrebbero scendere sotto i 1.600, con un valore intermedio attorno ai 2.000 già nel 2050. Si tratta di un calo significativo, che riflette una trasformazione del nostro clima verso stagioni fredde sempre più corte e miti.

Rispetto a quanto rilevato nello studio dei dati storici (Figura 10, i valori riferiti al 2025 si discostano poiché, come accennato in premessa, il dataset utilizzato caratterizza la situazione media della città di Milano e non può per sua natura rappresentare in maniera esatta la situazione in un punto specifico.

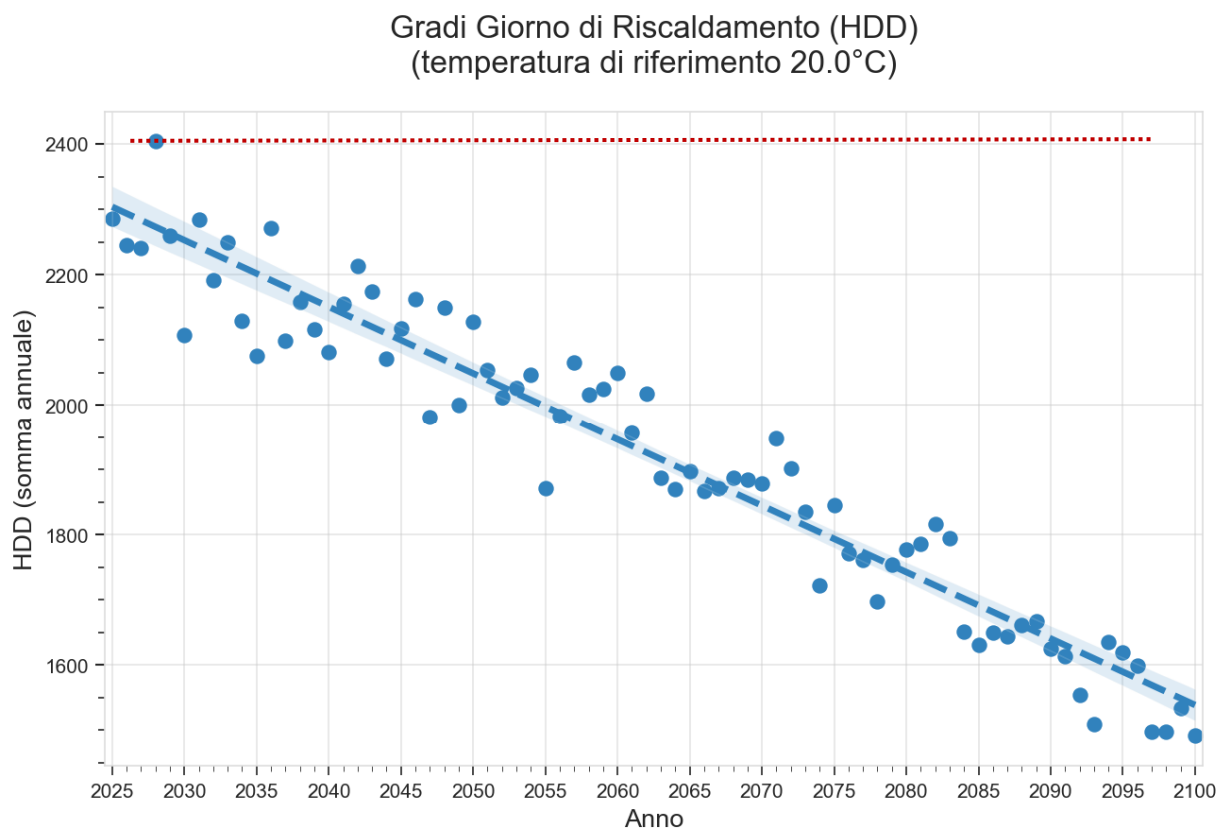


Figura 52: Proiezione futura Gradi Giorno di Riscaldamento (Milano - CMIP6 3 7.0)

11.3 Gradi giorno di raffrescamento

I Gradi Giorno di Raffrescamento (in inglese Cooling Degree Days, CDD) sono un indicatore che misura la domanda energetica necessaria per mantenere freschi gli ambienti interni durante i periodi caldi dell'anno. Così come i Gradi Giorno di Riscaldamento stimano quanto calore serve in inverno, i CDD stimano quanta energia è necessaria per raffrescare gli edifici quando fuori fa caldo.

Più alta è la temperatura esterna rispetto al comfort interno, maggiore sarà il valore dei Gradi Giorno di Raffrescamento e, di conseguenza, maggiore sarà la domanda di energia per climatizzatori, pompe di calore o altri impianti di condizionamento.

Storicamente, in molte aree del Nord Italia – inclusa Milano – i Gradi Giorno di Raffrescamento sono sempre stati relativamente contenuti, perché le estati non erano così lunghe o torride da richiedere un raffrescamento intensivo.

Le proiezioni climatiche indicano un aumento deciso di questo parametro. Nello scenario indagato, per la città di Milano i Gradi Giorno di Raffrescamento potrebbero raggiungere circa 300 attorno al 2050, fino ad arrivare a quasi 700 entro la fine del secolo. Questo significa che la domanda di energia per il raffrescamento potrebbe più che raddoppiare rispetto ai valori attuali.

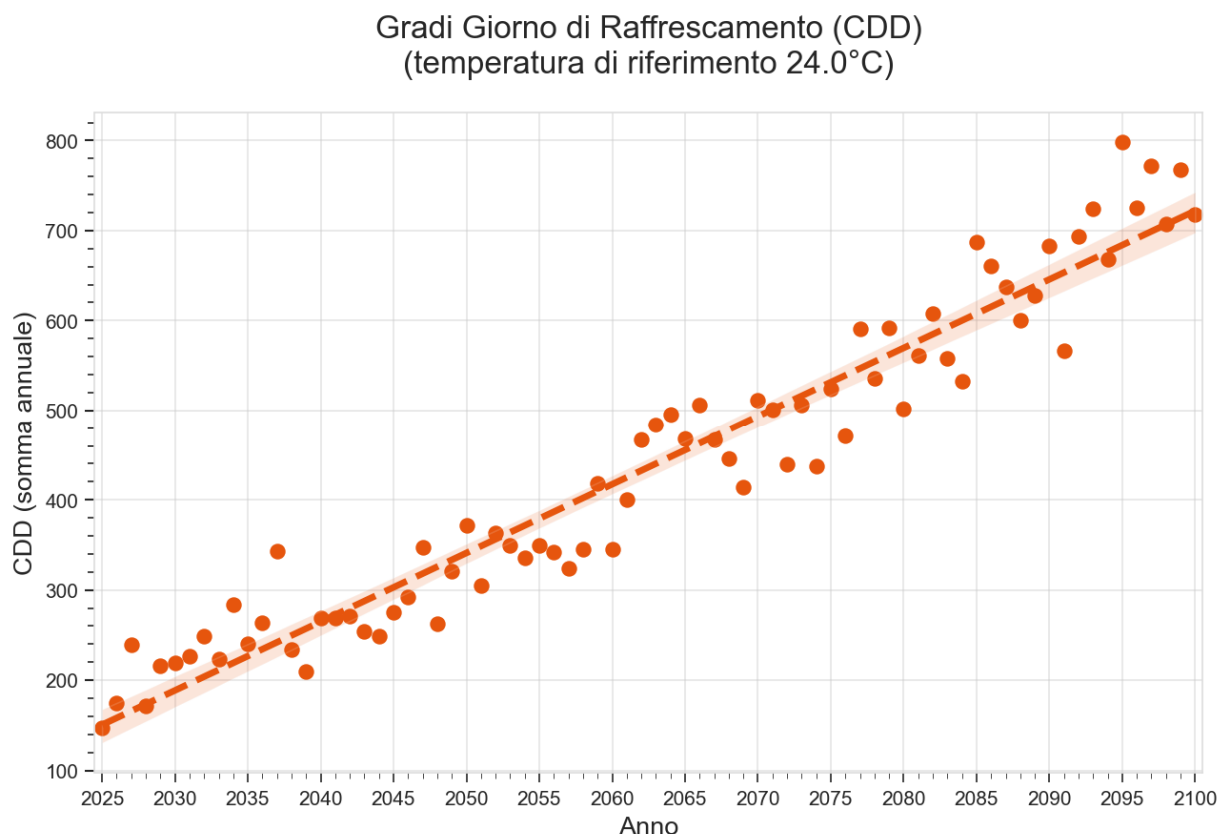


Figura 53: Proiezione futura Gradi Giorno di Raffrescamento (Milano - CMIP6 3 7.0)

11.4 Giorni freddi

Nell'analisi del clima invernale, uno degli indicatori più significativi è il numero di giorni di gelo (FD – Frozen Days), cioè i giorni in cui la temperatura minima scende sotto 0 °C. Un altro indicatore tradizionalmente utilizzato è quello dei giorni di ghiaccio (Txice), che rappresentano i giorni ancora più rigidi in cui anche la temperatura massima rimane sotto lo zero.

Dai dati storici della stazione meteorologica in centro a Milano, è già evidente che i giorni di ghiaccio sono praticamente scomparsi, confermando un segnale chiaro di inverni sempre più miti. Il grafico qui riportato (Figura 54) mostra in dettaglio l'andamento futuro dei giorni di gelo secondo le proiezioni climatiche basate su modelli CMIP6 regionalizzati per l'area urbana di Milano. Non sono presenti e quindi non sono visibili i cosiddetti giorni di giacchio (ovvero i giorni in cui anche la temperatura massima è inferiore a zero), in linea con quanto già riscontrato storicamente.

Si nota chiaramente un trend in discesa:

- Nei primi decenni, fino al 2050 circa, i giorni di gelo diminuiscono riducendosi a valori molto bassi, di pochi giorni anno.
- Dopo il 2050, i giorni con temperature minime inferiori a zero tendono a diventare sempre più sporadici, fino a scomparire entro la fine del secolo.

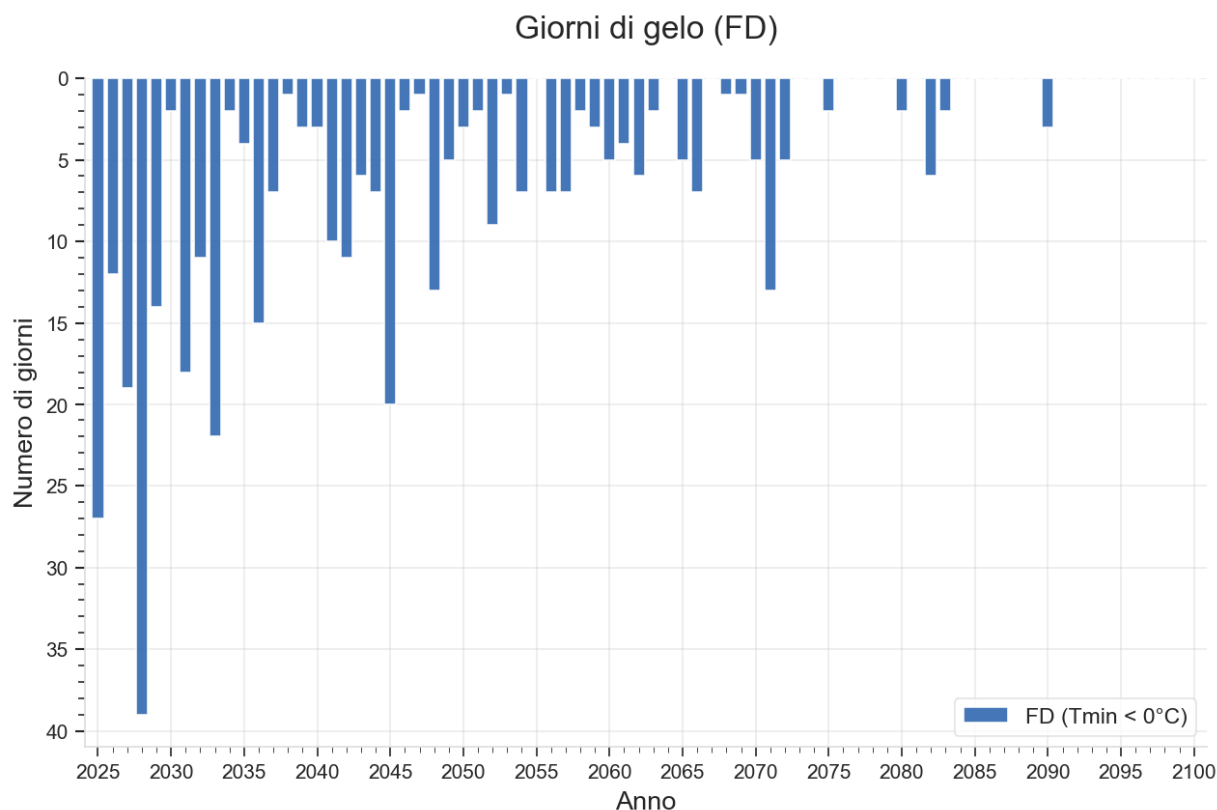


Figura 54: Proiezione numero di giorni di gelo (Milano - CMIP6 3 7.0)

12 PROIEZIONI CLIMATICHE DELLO STRESS TERMICO

12.1 Giornate estive

L'indicatore Summer Days (SU), utilizzato per misurare la frequenza di giorni caldi in un determinato periodo, è definito come un giorno in cui la temperatura massima supera i 25 °C.

Si è indagato l'andamento di questo indice negli anni per l'area di Milano, con riferimento sia alla soglia dei 25 °C che alla soglia dei 30 °C, per indagare anche il superamento di soglie di valori più elevati e maggiormente correlati a situazioni di disagio psicofisico.

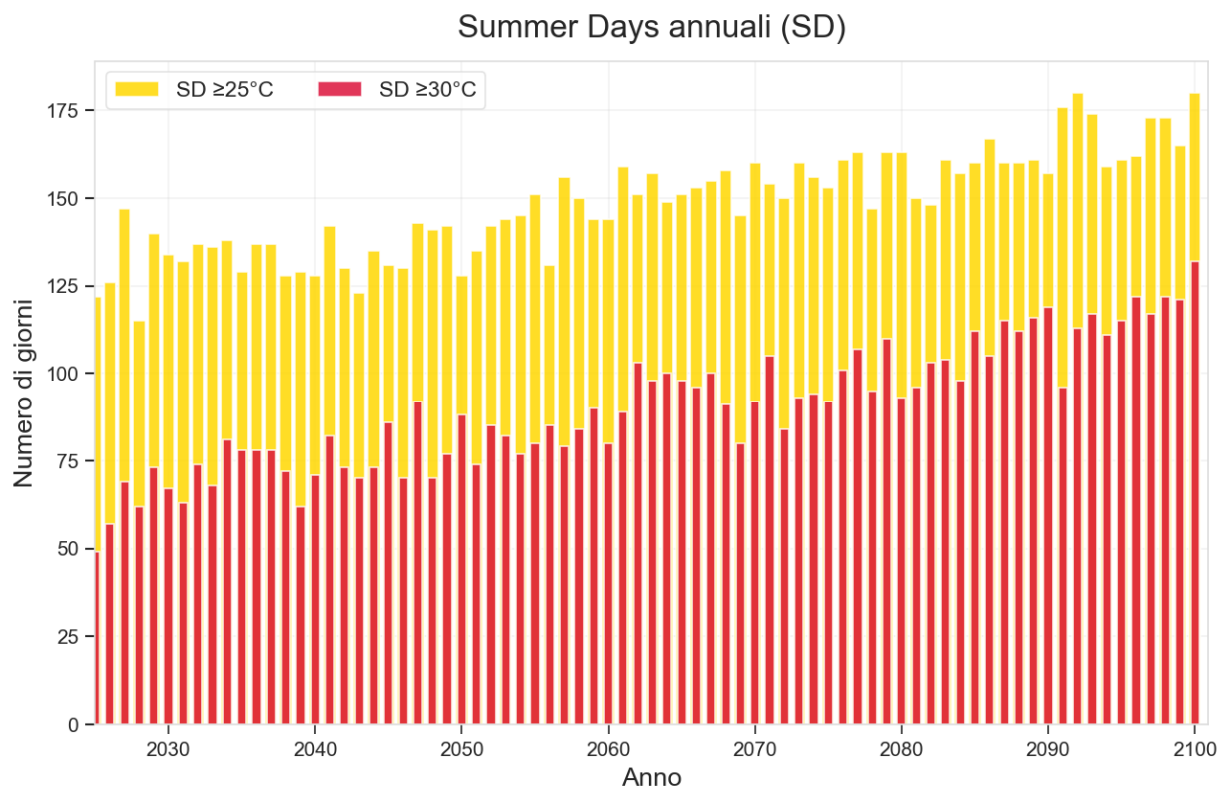


Figura 55: Proiezione summer days per anno (Milano - CMIP6 3 7.0)

Come emerge chiaramente dal grafico (Figura 55), entro fine secolo per circa metà anno saranno ricorrenti giorni con temperature massime superiori a 25 °C e per quasi un terzo dell'anno temperature superiori a 30 °C.

Analogamente a quanto fatto nell'analisi dei dati storici, si è indagato anche la ricorrenza di giorni con temperatura massima superiore a 35 °C (Figura 56), di particolare interesse per quanto concerne la tutela della salute e sicurezza di lavoratori negli ambienti di lavoro. Anche in questo caso, nella seconda metà del secolo, più di un mese sarà caratterizzato da valori di temperatura elevata.

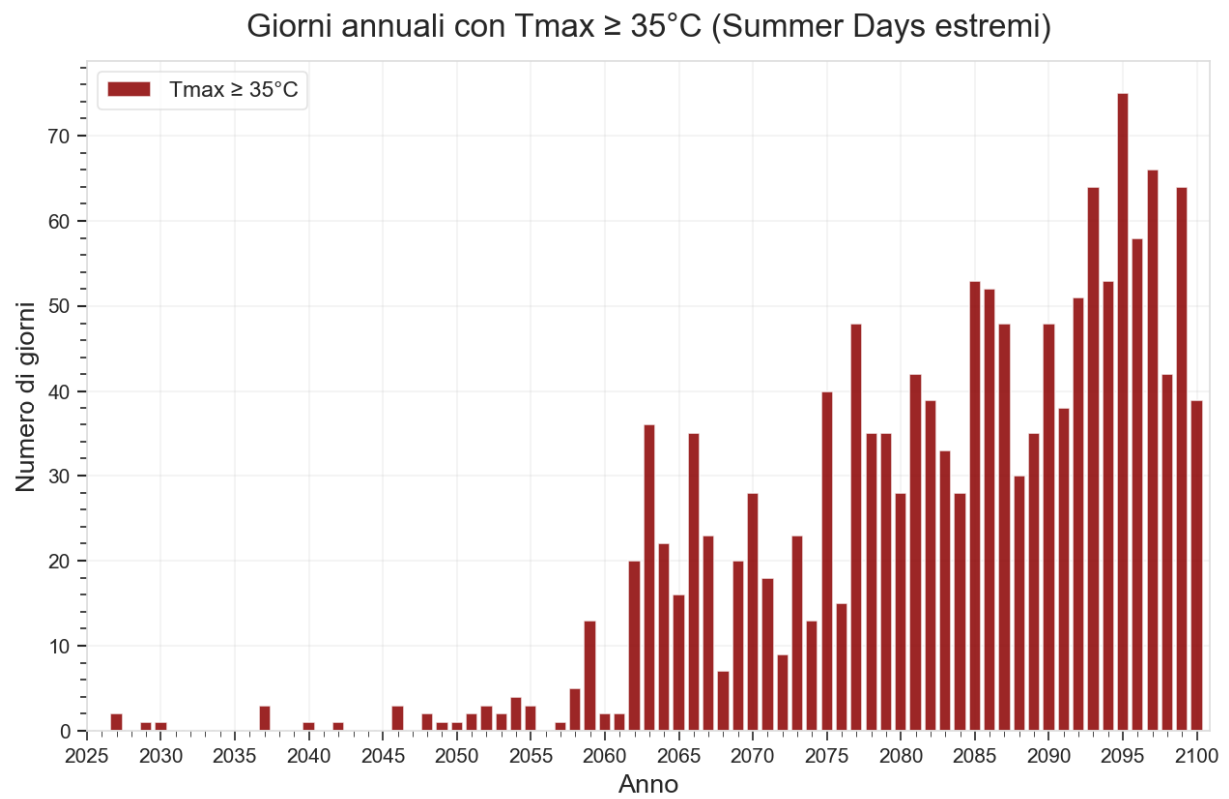


Figura 56: Proiezione numero di giorni con temperatura media superiore a 35 °C (Milano - CMIP6 3 7.0)

12.2 Notti tropicali

Il grafico seguente (Figura 57) mostra la distribuzione annuale delle “notti tropicali” a Milano, cioè il numero di giorni in cui la temperatura minima non scende sotto i 20 °C (giallo) e quelli ancora più caldi, con minime superiori a 25 °C (arancione). Si sono inoltre verificate anche le giornate con temperatura minima superiore a 28 °C (rosso).

Guardando l'andamento nel tempo, il trend indica inequivocabile che già nei prossimi 20–30 anni, attorno al 2050, Milano potrà sperimentare in media circa 80–90 notti tropicali all'anno, con le notti caldissime (≥ 25 °C) che inizieranno a comparire in modo più significativo, raggiungendo 20–30 notti per anno in alcuni casi.

Entro la fine del secolo (2100), le proiezioni indicano una crescita ancora più marcata: si potrebbero superare 120 notti tropicali all'anno, di cui fino a 70–80 notti con minime sopra i 25 °C. In pratica, per quasi un terzo dell'anno, le temperature notturne potrebbero non scendere mai sotto la soglia del “disagio termico”.

Si tratta, come detto, di valori “medi” relativi alla media dei modelli climatici: già nel recente passato (ad esempio nel 2022) nella stazione di Milano Brera si sono registrate più di 100 notti tropicali, di cui oltre 40 consecutive.

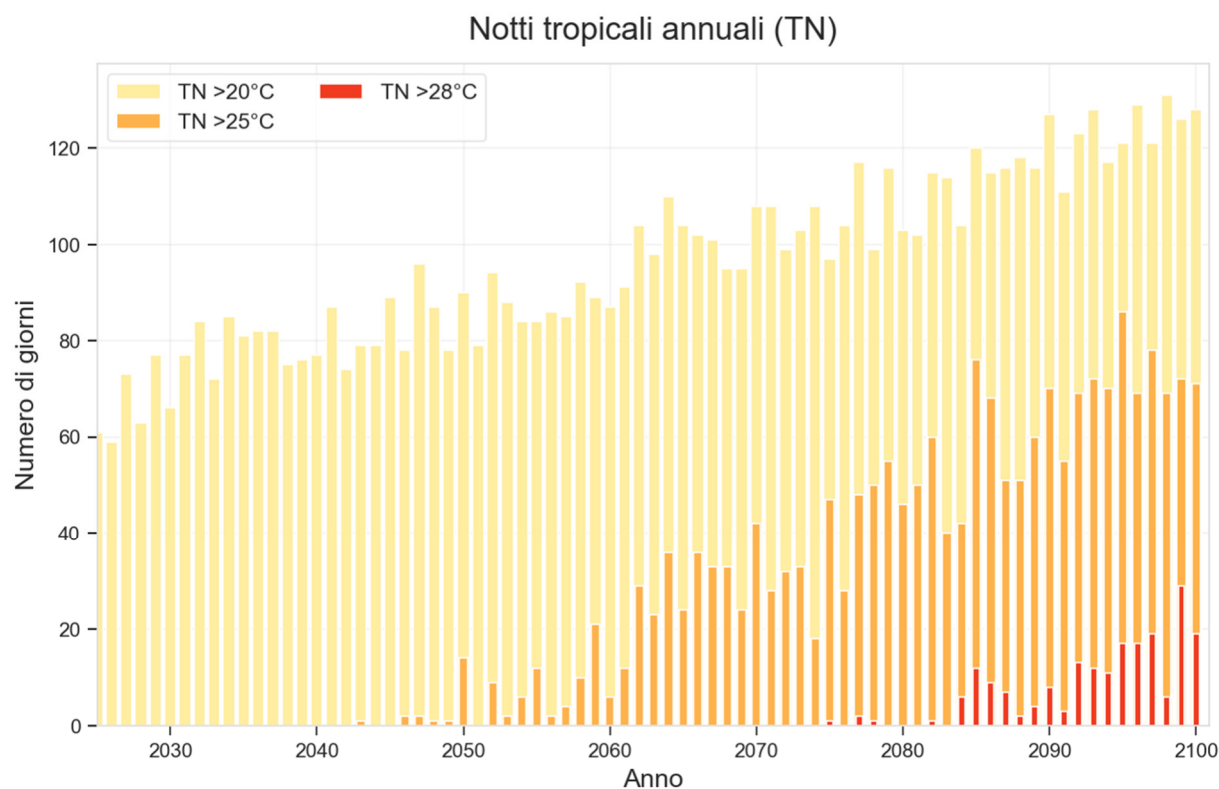


Figura 57: Proiezione numero di notti tropicali per anno (Milano - CMIP6 3 7.0)

12.3 Ondate di calore

L'incremento delle temperature sul lungo periodo, discusso nei capitoli precedenti, 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, che viene indagato utilizzando l'indicatore climatico WSDI. Rispetto alla lettura riferita ai dati storici, l'indicatore è stato calcolato con riferimento al periodo di riferimento 1985-2014, che è il trentennio utilizzato dal modello CMIP6 come periodo storico. Anche in questo caso l'indicatore non è direttamente confrontabile con quanto espresso nella prima parte di analisi dei dati storici, in quanto in quella fase il periodo di riferimento preso in considerazione era il 1971-2000 e con dati puntuali della sola stazione di Milano Brera. In termini pratici, come già illustrato nell'analisi dei dati storici, l'indice conta i giorni che fanno parte di sequenze di almeno 6 giorni consecutivi in cui le temperature massime risultano significativamente superiori rispetto ai valori tipici dello stesso periodo dell'anno nel clima di riferimento (1985-2014)⁹. Si rammenta infine, come già accennato in precedenza, che l'indicatore misura la durata dei periodi di caldo intenso e prolungato: In questo capitolo si utilizza per semplicità la dicitura "ondate di calore" anche normalmente con questo termine si intendono i soli periodi di caldo estivo.

Il fatto che l'indicatore raggiunga valori prossimi ai 350 giorni annui significa che, verso fine secolo, praticamente durante tutto l'anno si verificheranno condizioni termiche che oggi considereremmo eccezionalmente calde. Questo non implica necessariamente temperature estreme ogni singolo giorno, ma piuttosto che le temperature che oggi rappresentano eventi anomali diventeranno la nuova normalità climatica, manifestandosi in sequenze prolungate e persistenti durante tutte le stagioni.

In sintesi, il grafico evidenzia una transizione da un clima in cui i periodi di caldo anomalo sono eventi occasionali e limitati nel tempo, a un regime climatico in cui tali condizioni diventeranno prevalenti e quasi permanenti nell'arco dell'anno.

Si rileva inoltre che l'aumento dell'indicatore è dovuto anche al riscaldamento del periodo invernale, dove il caldo anomalo si riferisce a periodi di inverni miti, che sono sicuramente più sopportabili rispetto al cado anomalo estivo, seppure con impatti non trascurabili ad esempio sulla vegetazione.

⁹ https://etccdi.pacificclimate.org/list_27_indices.shtml

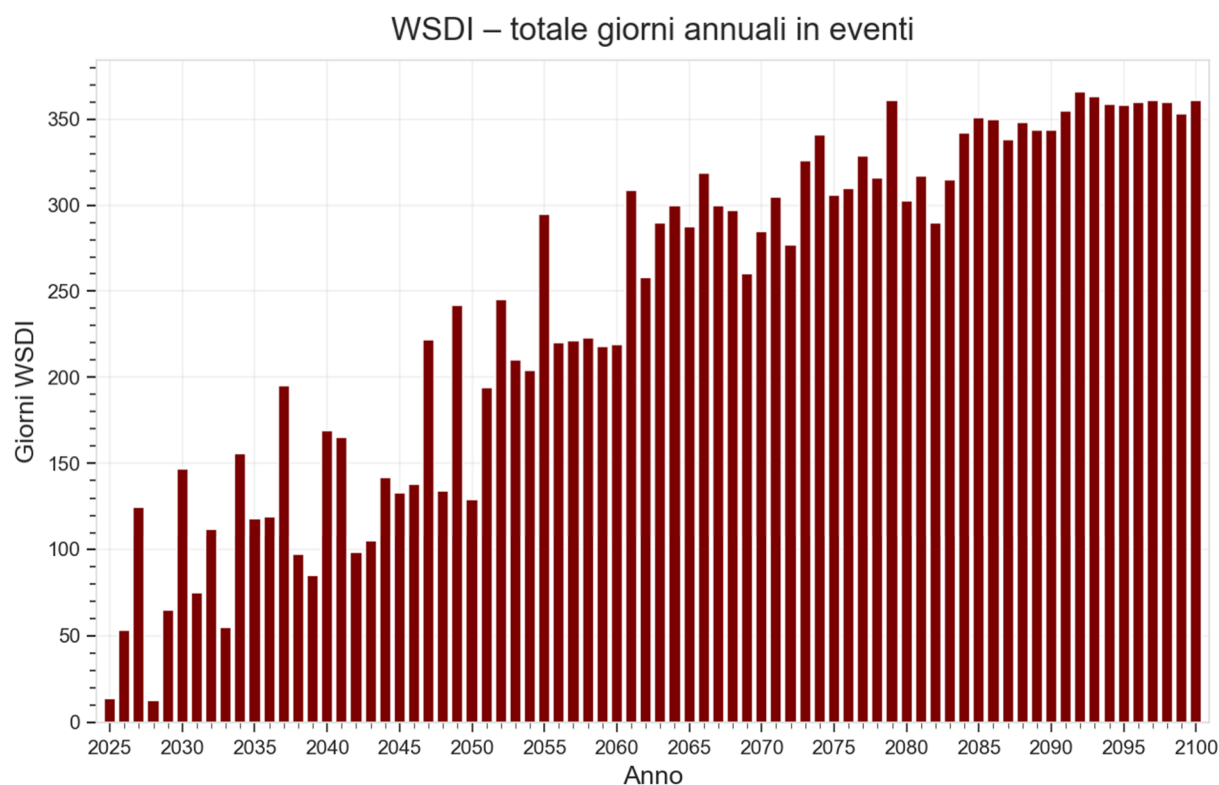


Figura 58: Proiezioni andamento ondate di calore (Milano - CMIP6 3 7.0)

Oltre alla definizione standard ETCCDI del WSDI, nell'ambito dell'analisi degli scenari futuri è stato indagato anche l'indicatore "Climatological Heatwave Days" sviluppato nell'ambito del Copernicus Climate Change Service (C3S) per il portale Climate-ADAPT dell'Agenzia Europea per l'Ambiente (EEA)¹⁰.

Questo indicatore è stato specificamente progettato per supportare le politiche europee di adattamento ai cambiamenti climatici, con particolare attenzione agli impatti settoriali più severi: salute umana, agricoltura, domanda energetica, rischio incendi e infrastrutture critiche.

L'indicatore conta il numero di giorni in un anno che fanno parte di ondate di calore climatologiche, definite come periodi di **almeno 3 giorni consecutivi** in cui la temperatura massima supera il **99° percentile** delle temperature massime giornaliere del periodo **maggio-settembre** in un periodo di riferimento.

Le caratteristiche distintive rispetto al WSDI standard sono:

- Soglia più elevata (99° vs 90° percentile): identifica solo gli eventi più estremi e rari (top 1% della distribuzione), quelli associati a impatti acuti e crisi sistemiche piuttosto che semplici anomalie termiche.
- Durata minima ridotta (3 vs 6 giorni): anche brevi periodi di calore estremo possono causare blackout energetici, picchi di mortalità e stress idrico critico, specialmente nelle aree urbane densamente popolate.
- Focus stagionale (maggio-settembre): concentra l'analisi sul periodo di massima vulnerabilità socio-economica, quando le temperature estreme si combinano con

¹⁰ <https://climate-adapt.eea.europa.eu/en/metadata/indicators/climatological-heatwave-days>

elevata domanda di raffreddamento, stress idrico agricolo e maggiore esposizione outdoor della popolazione.

Questo approccio risulta particolarmente utile per:

- Analisi di rischio estremo: quantificare eventi con probabilità di accadimento molto bassa ma impatti potenzialmente catastrofici
- Valutazioni costi-benefici: dimensionare investimenti in misure di adattamento strutturali (es. piani di emergenza sanitaria, potenziamento reti elettriche, sistemi di early warning)
- Pianificazione di lungo termine: identificare nelle proiezioni climatiche future i periodi con maggiore probabilità di eventi eccezionali che richiedono preparazione anticipata

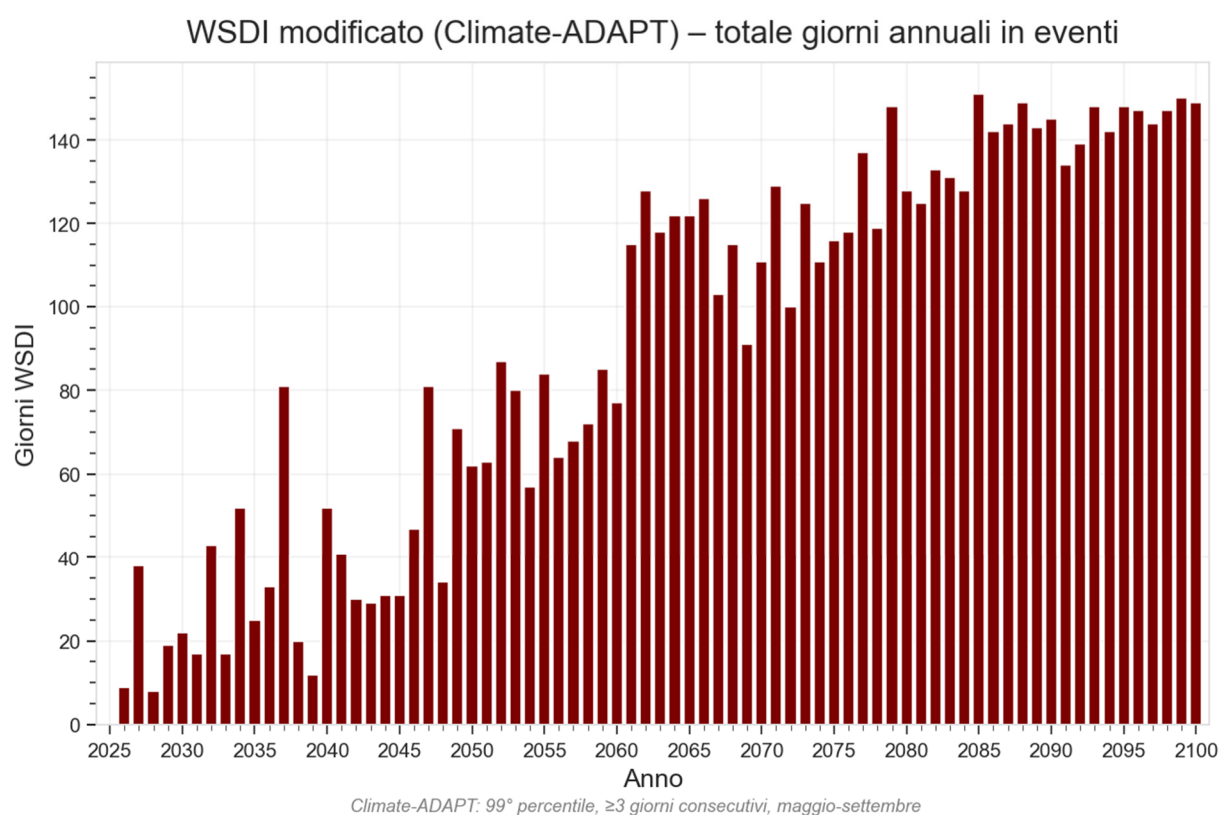


Figura 59: Proiezioni andamento ondate di calore – indice WSDI modificato per periodo estivo esteso (Milano - CMIP6 3 7.0)

Anche in questo caso si evidenzia come dopo il 2050 da maggio a settembre saranno presenti valori di temperatura al di fuori dei valori eccezionali riscontrati nel periodo di riferimento 1985-2014.

12.4 Analisi dello stress termico e rischi per la salute

Ad integrazione delle analisi, si è approfondita la valutazione l'impatto dell'aumento delle temperature sulla salute pubblica e sulla sicurezza lavorativa, sono stati analizzati due indici bioclimatici fondamentali, calcolati sui dati giornalieri massimi (temperatura massima e umidità relativa concomitante).

- **Humidex** (Indice di Disagio Termico): Sviluppato dai meteorologi canadesi (xv) e ampiamente adottato in Italia (es. Aeronautica Militare, ARPA), questo indice combina l'effetto della temperatura dell'aria e della pressione di vapore per stimare la temperatura percepita dal corpo umano. L'analisi si concentra su due soglie critiche:
 - Soglia > 35 (Attenzione/Rischio Lavorativo): Corrisponde all'inizio di un disagio evidente. In ambito occupazionale (linee guida INAIL/Progetto Workclimate xii), valori superiori a 35 richiedono misure di mitigazione per attività fisica intensa o esposizione al sole.
 - Soglia > 45 (Pericolo Elevato/Rischio sanitario): Secondo la scala ufficiale di Environment Canada e del Canadian Centre for Occupational Health and Safety (CCOHS), valori superiori a 45 configurano condizioni pericolose per la salute, con rischio concreto di colpo di calore, e richiedono la riduzione di ogni attività fisica non essenziale. Le linee guida occupazionali ACGIH impongono, sopra questa soglia, esclusivamente lavoro sotto supervisione medica (xviii).
- **Wet Bulb Temperature** (Tw - Temperatura di Bulbo Umido): Calcolata secondo il metodo Stull (xxii), la Tw rappresenta la temperatura più bassa raggiungibile mediante evaporazione (sudorazione). È l'indicatore fisico più rigoroso per la termoregolazione.
 - Soglia > 28 °C: Sebbene il limite teorico di sopravvivenza sia 35°C Tw, la soglia di 28°C è considerata internazionalmente (ISO 7243) come il punto in cui l'efficacia del raffreddamento corporeo crolla drasticamente, rendendo pericolosa qualsiasi attività fisica prolungata all'aperto.

L'uso dei valori massimi giornalieri rappresenta lo scenario di "picco di stress" durante le ore centrali della giornata.

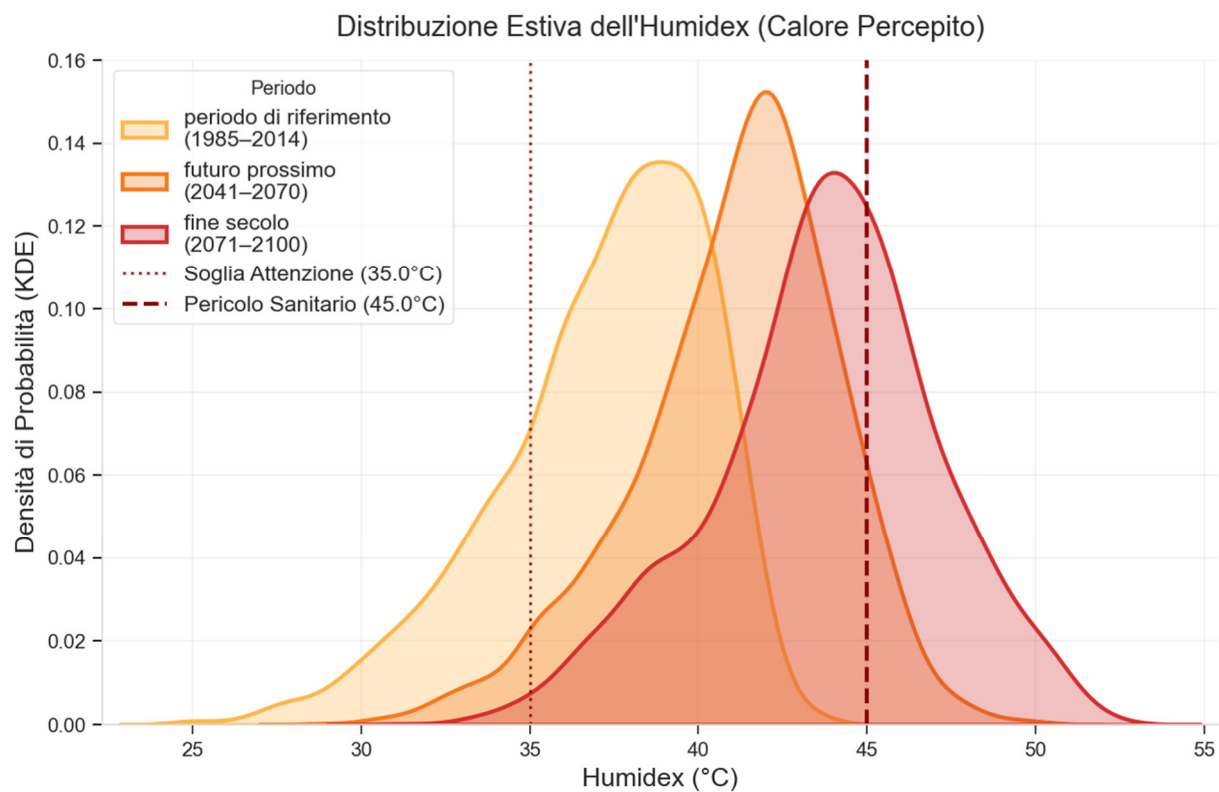


Figura 60: Distribuzione Estiva dell'Humidex (Calore Percepito) massimo giornaliero

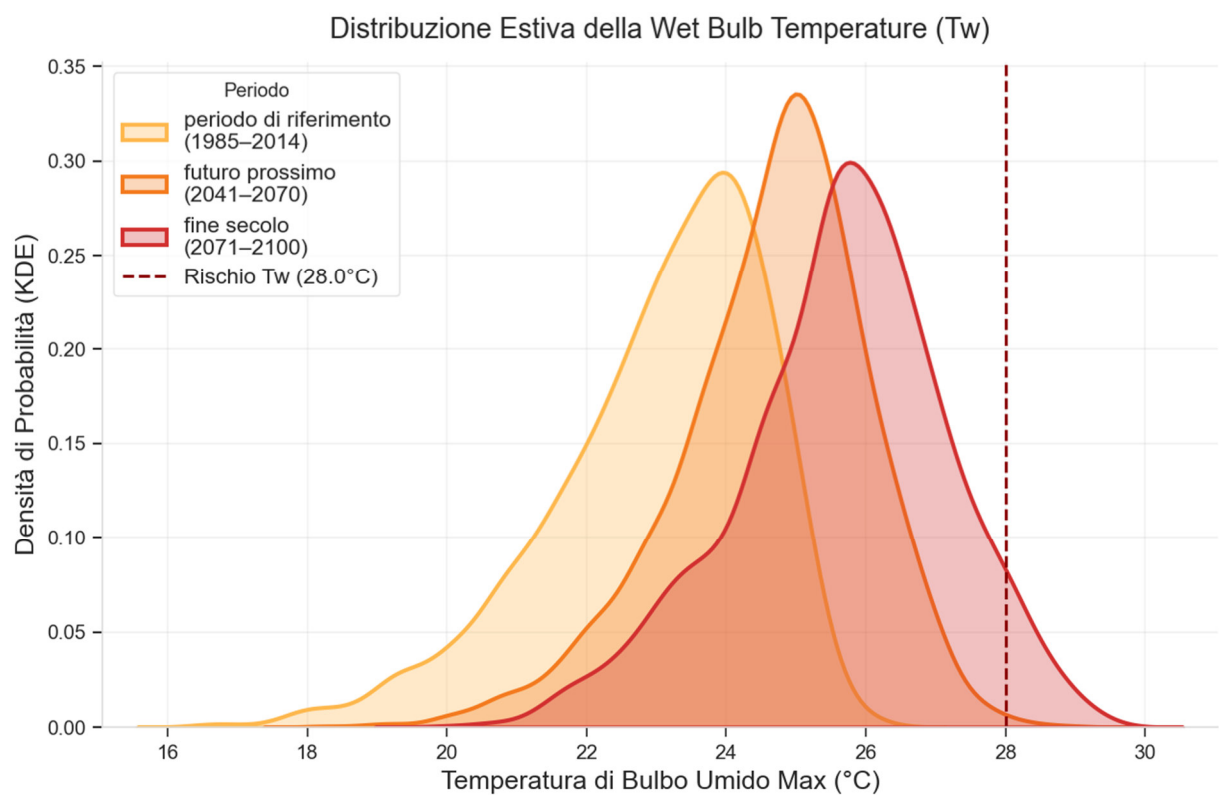


Figura 61: Distribuzione Estiva della Wet Bulb Temperature (Tw) massima giornaliera

I grafici di Distribuzione della Densità (KDE) rappresentano la prova più evidente di come l'aumento delle temperature globali non sia limitato a un innalzamento dei valori massimi occasionali, ma consista in uno **spostamento strutturale dell'intero spettro termico estivo**. In altre parole: il clima estivo che abbiamo conosciuto negli anni di riferimento (1985–2014) si sta muovendo interamente verso condizioni che oggi consideriamo estreme.

Questo fenomeno di "shift" è fondamentale per comprendere l'impatto sulla salute pubblica e lavorativa, misurato attraverso la Wet Bulb Temperature (Tw) e l'Humidex (Calore Percepito).

L'Humidex traduce l'effetto combinato di temperatura e umidità nella temperatura che l'essere umano percepisce. L'analisi è focalizzata su due livelli di allerta che evidenziano la rapida escalation del disagio (Figura 60):

- Soglia di Attenzione (35 °C - Linea tratteggiata): Questa soglia è il limite per il "rischio moderato" e il punto oltre il quale le attività lavorative, in particolare all'aperto, richiedono precauzioni obbligatorie (linee guida INAIL).

Entro la fine del secolo, la curva rossa mostra come la maggior parte delle giornate estive si collocherà ben al di sopra di questo limite. Il lavoro estivo subirà un'interruzione o una riorganizzazione quasi totale, con pesanti impatti economici e logistici.

- Pericolo elevato (45 °C - Linea più spessa): Questa soglia rappresenta il "pericolo concreto", associato a un rischio elevato e immediato per la salute di anziani, bambini e soggetti fragili.

Nel periodo di fine secolo, una temperatura percepita di 45 °C non sarà più l'eccezione dell'ondata di calore, ma una condizione termica più frequente e probabile durante le estati del futuro.

La Wet Bulb Temperature è l'indicatore più fedele del rischio fisiologico, perché misura la capacità del corpo umano di raffreddarsi tramite l'evaporazione del sudore. La soglia critica di 28 °C è una linea di guardia: superarla significa che il meccanismo di termoregolazione è gravemente compromesso, aumentando il rischio di colpo di calore e stress.

Il grafico (Figura 61) mostra che nel periodo di riferimento (curva arancione chiara), la Wet Bulb Temperature media estiva si collocava a una distanza di sicurezza dalla soglia di 28 °C.

Nello scenario di fine secolo (curva rossa), l'intero profilo si sposta, avvicinandosi o superando stabilmente i 26 °C. Ciò significa che le condizioni in cui il corpo fatica enormemente a disperdere calore si verificheranno con una frequenza molto più alta, coinvolgendo intere settimane e non solo le rare ondate di calore.

In conclusione, lo spostamento delle distribuzioni indica una "normalizzazione" del rischio. Le misure di adattamento non dovranno più concentrarsi solo sull'emergenza, ma sulla gestione di un rischio quotidiano e strutturale, richiedendo un ripensamento profondo dell'urbanistica, dei sistemi di raffreddamento passivo e della gestione della salute pubblica.

13 PROIEZIONI CLIMATICHE DELLE PRECIPITAZIONI

13.1 Precipitazione cumulata: tendenze e cambiamenti

L'analisi delle precipitazioni totali annuali e stagionali simulate dai modelli CMIP6 per l'area milanese non evidenzia variazioni significative nel corso del periodo analizzato. Il valore medio annuo di precipitazione si mantiene pressoché costante, oscillando generalmente tra 900 e 1200 mm/anno, senza un trend definito né di aumento né di diminuzione. Questo suggerisce che, a scala annuale, il bilancio complessivo delle precipitazioni non mostra segnali marcati di cambiamento nel lungo periodo.

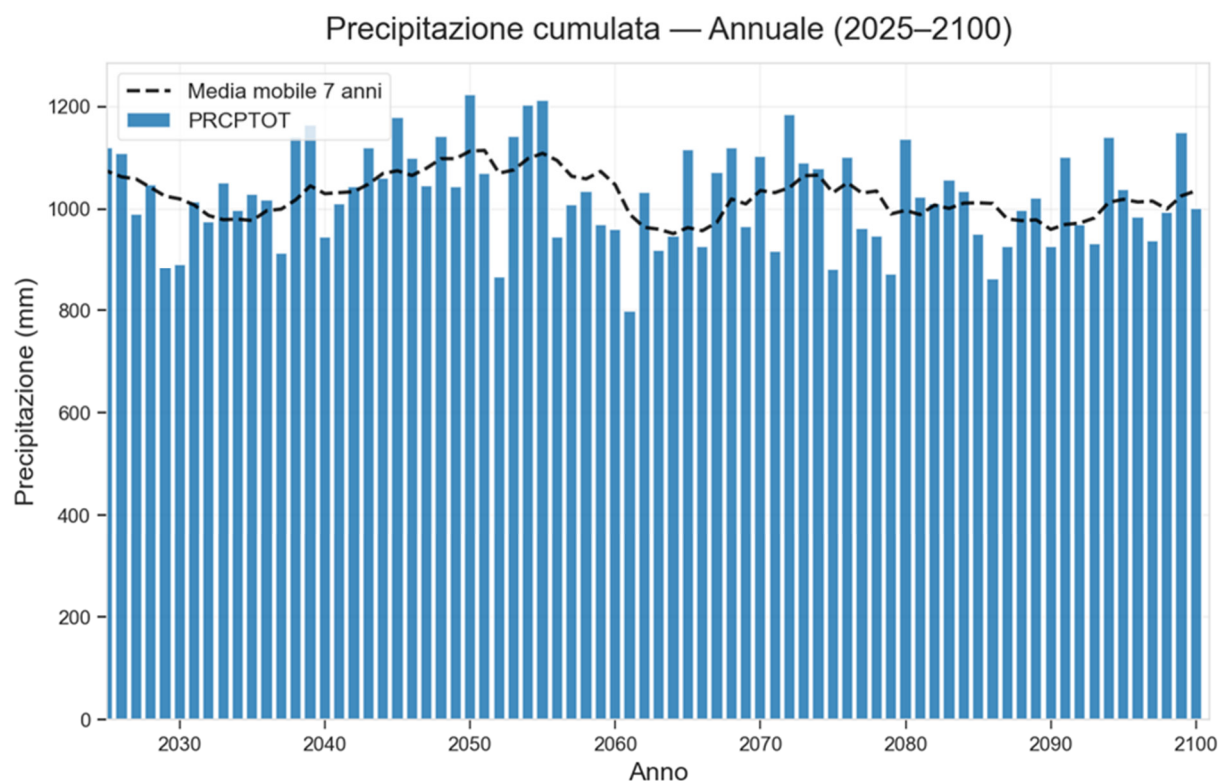


Figura 62: Proiezione precipitazione cumulata annua (Milano CMIP6 3 7.0)

Osservando le stagioni meteorologiche emergono alcune differenze:

- Primavera e autunno risultano le stagioni più piovose e mostrano un'elevata variabilità interannuale, ma senza un trend sistematico nel tempo. Si alternano periodi con precipitazioni abbondanti ad altri più secchi, in un quadro complessivamente stazionario.
- Inverno si osserva un trend crescente statisticamente significativo. L'aumento medio stimato è di +0.457 mm/anno (Figura 63).
- Durante la stagione estiva si osserva un trend decrescente, statisticamente significativo. La diminuzione media stimata più marcata, di -0.657 mm/anno. La riduzione estiva accentua i problemi di siccità e può intensificare lo stress idrico su ecosistemi e agricoltura (Figura 65).

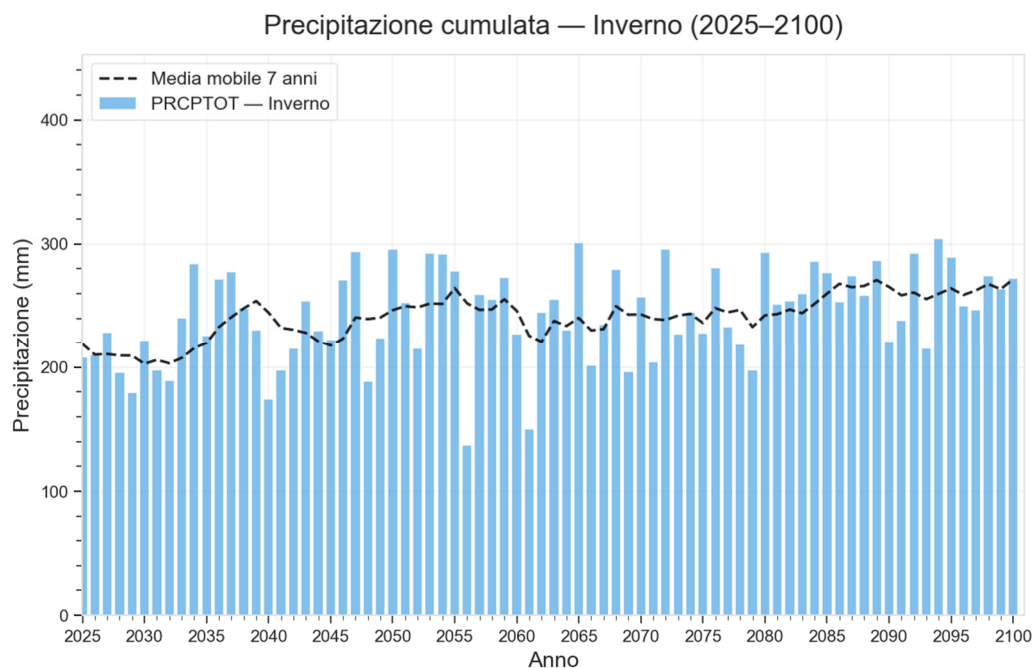


Figura 63: Proiezione precipitazione cumulata - inverno (Milano CMIP6 3 7.0)

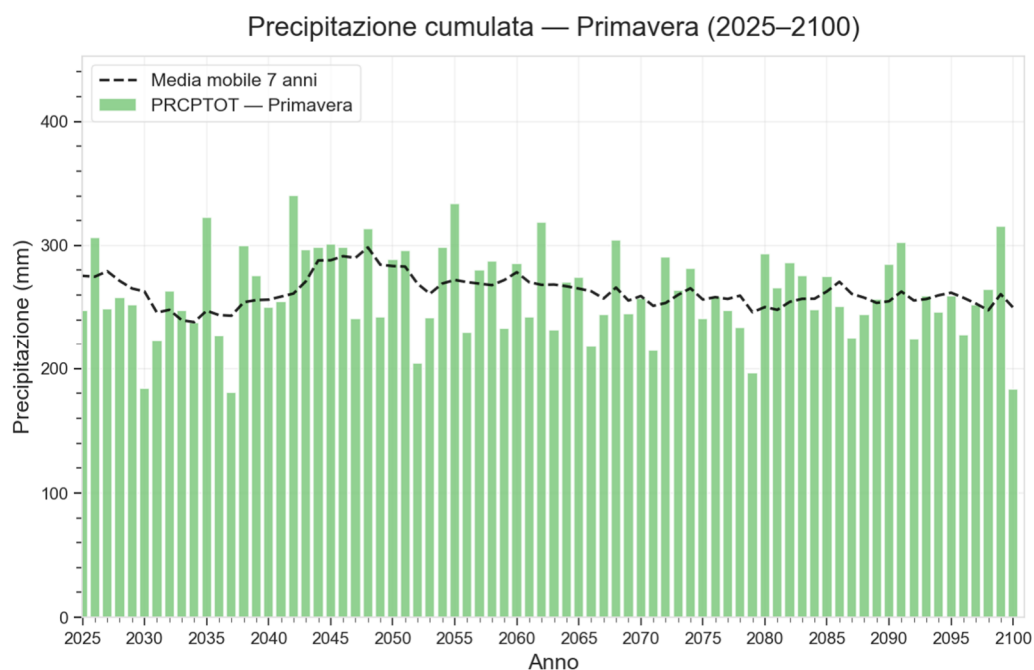


Figura 64: Proiezione precipitazione cumulata - primavera (Milano CMIP6 3 7.0)

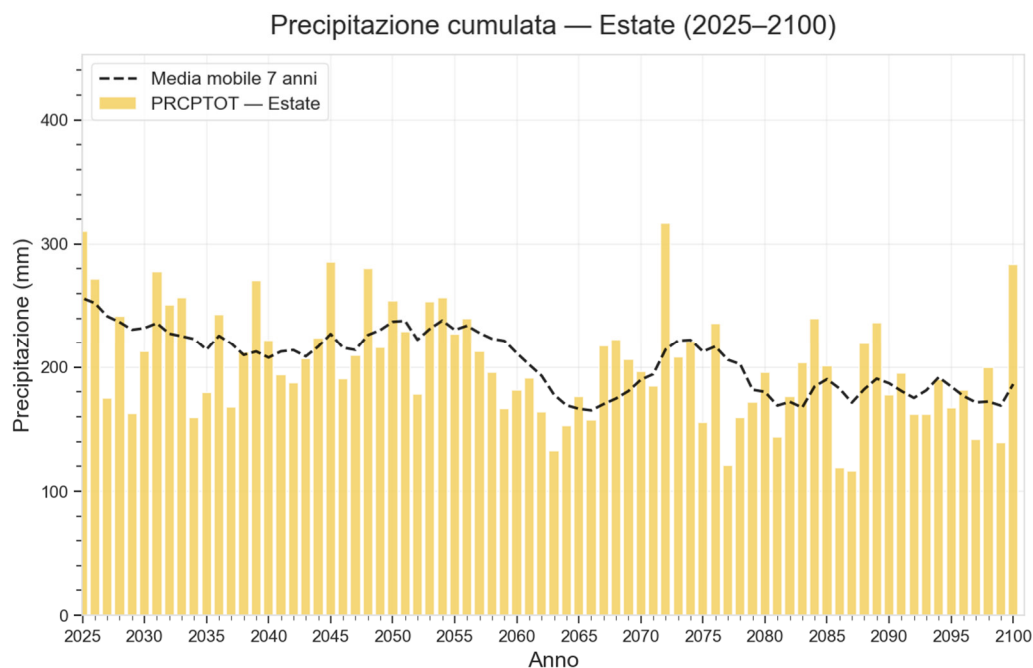


Figura 65: Proiezione precipitazione cumulata - estate (Milano CMIP6 3 7.0)

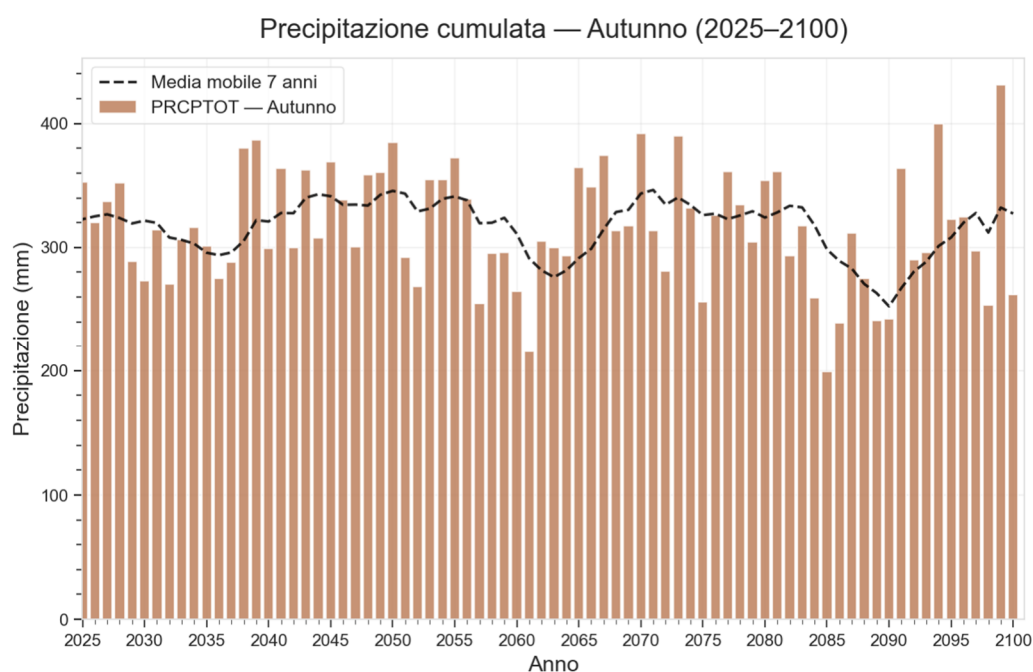


Figura 66: Proiezione precipitazione cumulata - autunno (Milano CMIP6 3 7.0)

Nel complesso, il quadro che emerge dai dati dell'ensemble CMIP6 per Milano è quello di una stabilità del regime pluviometrico annuale, con segnali di riduzione delle piogge estive lieve incremento di quelle invernali, in un contesto di persistente variabilità stagionale. Questi risultati riflettono la complessità del comportamento delle precipitazioni nel Nord Italia, dove le dinamiche locali e la natura convettiva di molti eventi estivi rendono difficile l'individuazione di tendenze lineari.

13.2 Estremi di precipitazione: frequenza degli eventi estremi e giorni secchi

Per quanto riguarda i trend futuri legati alle precipitazioni, in analogia con quanto fatto nell'analisi storica, sono stati indagati i giorni di precipitazione intense, definito come numero di giorni in un anno con precipitazione giornaliera superiore ai 20 mm (R20 - giorni), e la media stagionale dei massimi giornalieri di precipitazione (RX1day - mm).

L'indicatore R20 rappresenta il numero di giorni in un anno in cui la precipitazione giornaliera raggiunge o supera i 20 mm, e costituisce una misura della frequenza degli eventi piovosi intensi anche se non ancora estremi in termini probabilistici, ma che possono contribuire a situazioni di allagamento urbano o stress per i sistemi di drenaggio.

Nel complesso, i risultati mostrano una sostanziale stabilità dell'indicatore R20 lungo tutto il periodo 2025–2100.

La media dell'ensemble si mantiene generalmente compresa tra 10 e 15 giorni all'anno con precipitazioni superiori a 20 mm, senza evidenze di trend crescente o decrescente statisticamente rilevante. E' presente variabilità interannuale, ma non si osservano cambiamenti strutturali nella frequenza degli eventi più intensi.

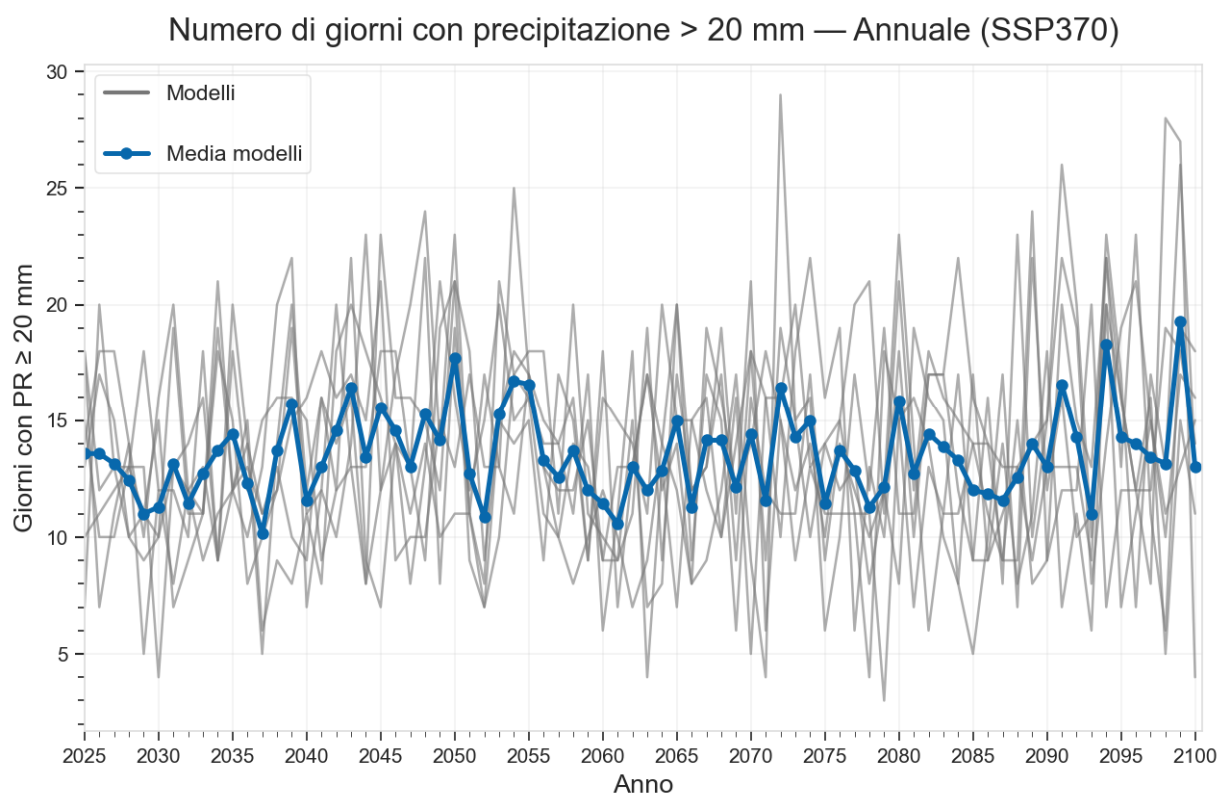


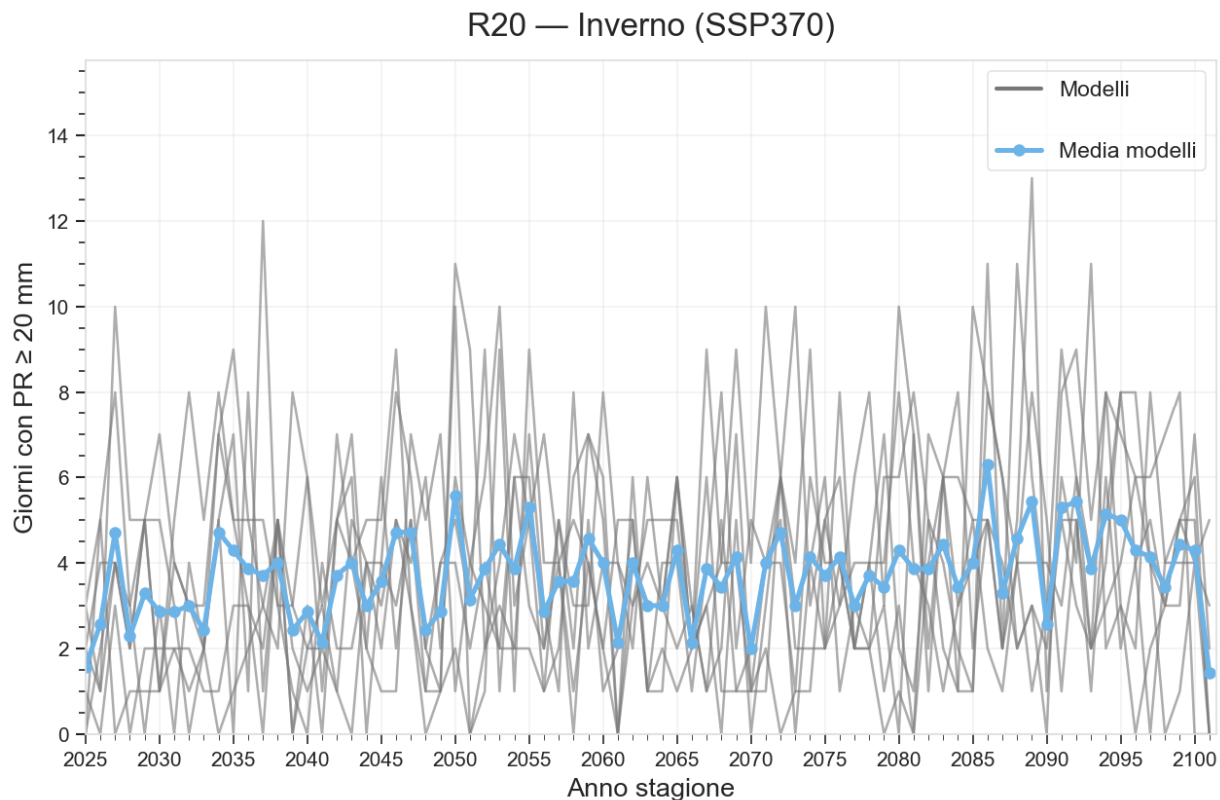
Figura 67: Proiezione numero di giorni con pioggia intensa (Milano CMIP6 3 7.0)

Analizzando il comportamento stagionale:

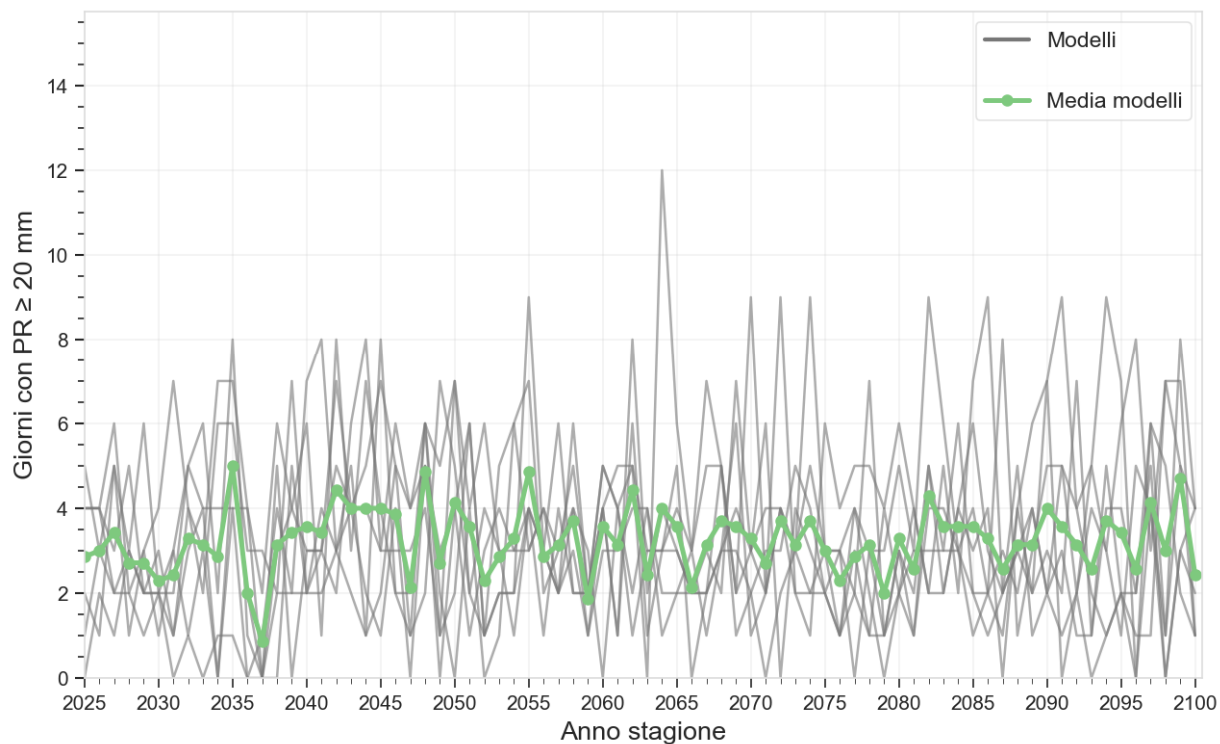
- L'autunno si conferma come la stagione con il numero maggiore di giorni R20, mediamente tra 4 e 6 all'anno, con un leggero incremento fino alla metà del secolo e successiva stabilizzazione.
- L'inverno e la primavera mostrano valori compresi tra 2 e 4 giorni, con oscillazioni irregolari ma nessuna tendenza netta.

- L'estate, infine, presenta i valori più bassi (circa 1–2 giorni), coerentemente con il carattere più convettivo e localizzato delle precipitazioni estive nell'area padana.

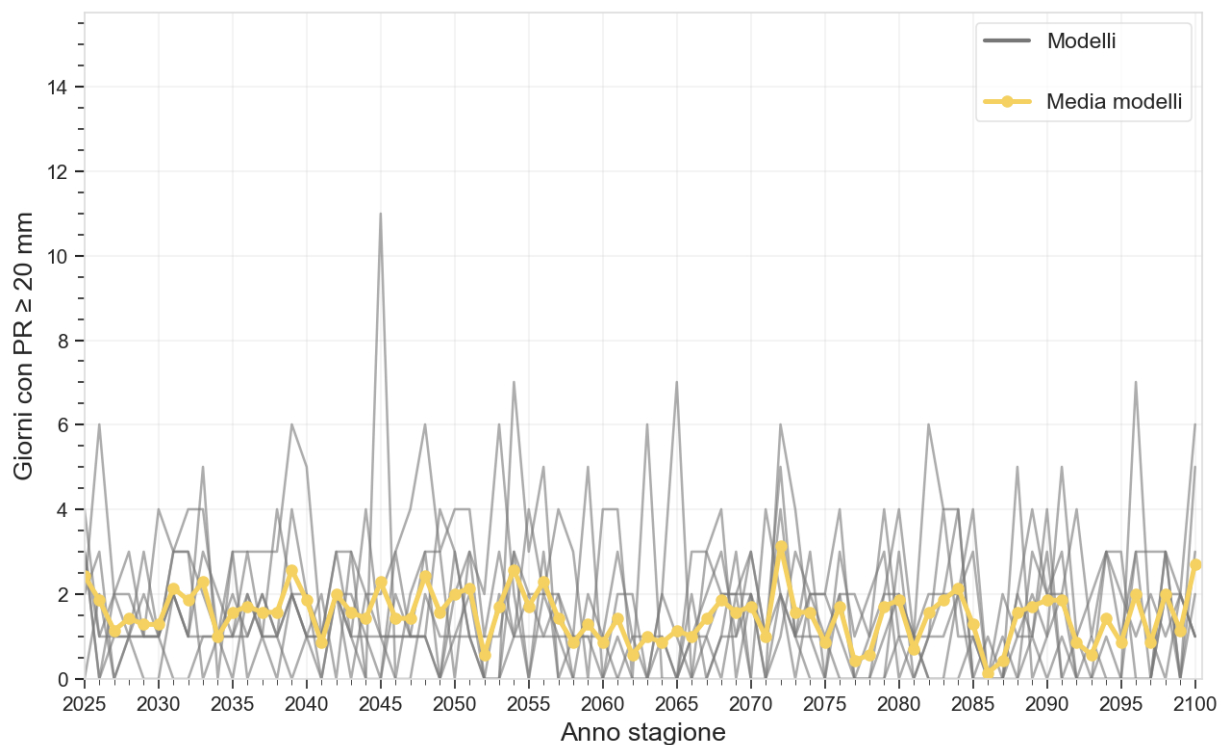
In sintesi, l'indicatore R20 suggerisce che, per la città di Milano, la frequenza delle piogge intense non mostra variazioni significative nel corso del secolo, pur in un contesto di forte variabilità naturale tra anni e stagioni.



R20 — Primavera (SSP370)



R20 — Estate (SSP370)



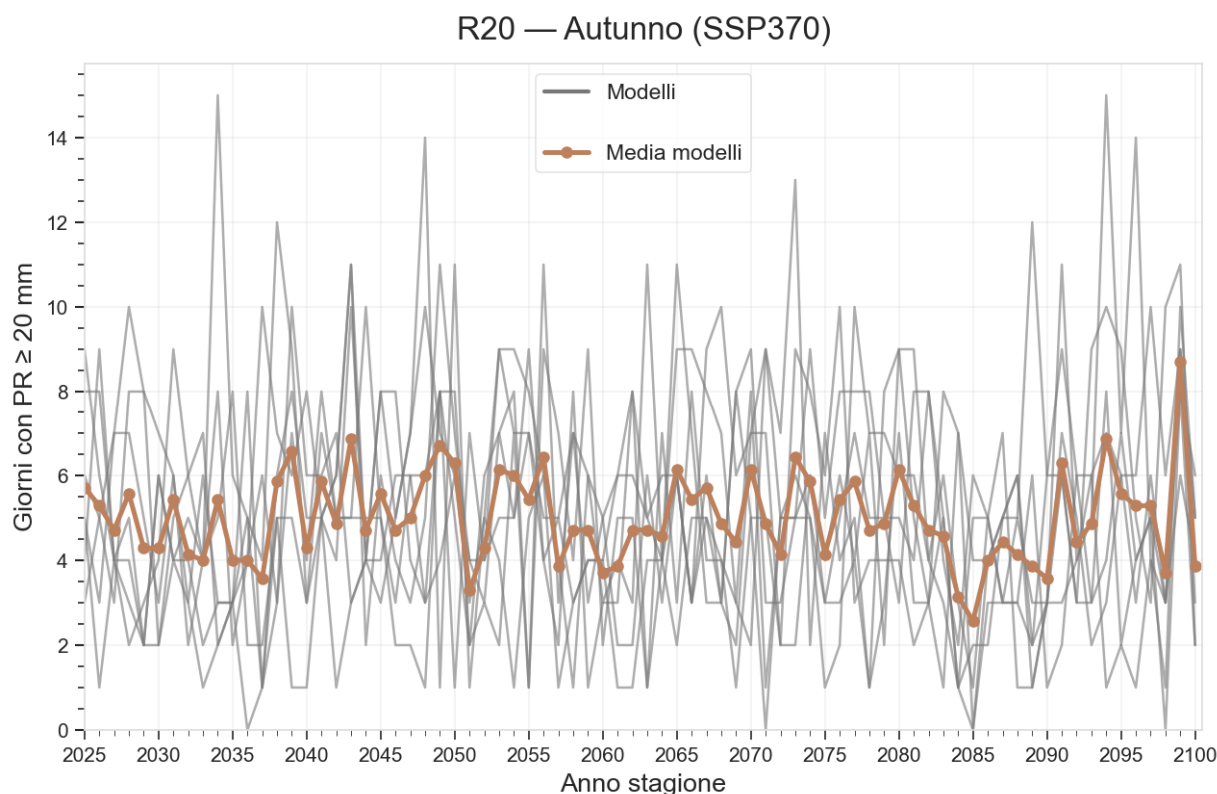


Figura 68: Proiezione numero di giorni con pioggia intensa – dati stagionali (Milano CMIP6 3 7.0)

Ciò indica una relativa stabilità nel regime degli eventi piovosi moderatamente intensi, mentre eventuali modifiche nei fenomeni estremi (piogge eccezionali) devono essere valutate attraverso altri indicatori specifici, come RX1day (precipitazione massima in 24 ore).

Il presente studio di profilo climatico si avvale delle proiezioni climatiche ad alta risoluzione CMCC SD-EQM_GCMs_IT. Questo set di dati combina le simulazioni di Modelli Climatici Globali (GCMs) con una risoluzione spaziale ottimizzata (circa 5.5 km), ottenuta tramite downscaling statistico.

Il metodo utilizzato è l'Empirical Quantile Mapping (EQM), una tecnica di correzione del bias che allinea la distribuzione di probabilità delle precipitazioni simulate dai GCM a quella di un dataset di riferimento storico di alta qualità, la rianalisi europea CERRA. Questo processo garantisce l'affidabilità del dataset per la maggior parte degli indici climatici, come la Precipitazione Totale o la Frequenza dei Giorni Piovosi, poiché corregge efficacemente gli errori sistematici e riproduce le statistiche climatiche medie e di varianza in modo coerente con l'osservazione locale.

Tuttavia nonostante l'alta performance per le metriche generali, l'analisi degli eventi di precipitazione estrema giornaliera (Rx1day) richiede una comprensione approfondita del vincolo metodologico legato all'EQM.

L'efficacia della correzione del bias tramite Quantile Mapping è intrinsecamente limitata dal range dei valori registrati nel dataset di calibrazione CERRA. Per sua natura, l'EQM stabilisce una funzione di trasformazione basata sulle corrispondenze storiche tra i quantili del modello grezzo e quelli dell'osservazione.

Se, per un'area specifica, il valore massimo di precipitazione giornaliera registrato da CERRA nel periodo di calibrazione è stato, ad esempio, di circa 90 mm, questo valore definisce di fatto

il limite superiore empirico della trasformazione statistica. La funzione di correzione non ha informazioni su come gestire fisicamente o statisticamente eventi superiori a questa soglia storica.

Per affrontare i valori futuri simulati dal GCM che eccedono il massimo storico di CERRA, il CMCC adotta una specifica tecnica di gestione degli estremi denominata "*constant extrapolation*". Questo non è un vero e proprio meccanismo di estrapolazione fisica, ma piuttosto un approccio conservativo:

- viene calcolata una differenza fissa (offset) tra il massimo storico osservato in CERRA e il massimo storico simulato dal GCM grezzo per il periodo di calibrazione.
- questo offset costante viene aggiunto ai valori di precipitazione estrema simulati dal GCM per il futuro.

Il risultato è che la forma della distribuzione di probabilità viene preservata, ma l'intensità del Rx1day nel futuro viene vincolata dalla discrepanza passata tra modello e osservazione.

Questo meccanismo ha una conseguenza diretta e cruciale: il dataset non è in grado di proiettare "nuovi estremi" nel senso di eventi di intensità significativamente superiore a quanto storicamente osservato. L'effetto è un "capping" (un tetto o un plateau) sui valori di Rx1day, che si stabilizzano attorno alla soglia massima definita da CERRA (in questo caso circa 90 mm).

Di conseguenza, gli studi di impatto idrologico che dipendono dalla simulazione di eventi con tempo di ritorno molto elevato (es. 100 o 200 anni) devono essere consapevoli che il dataset potrebbe sottostimare l'intensità massima potenziale prevista dal modello climatico.

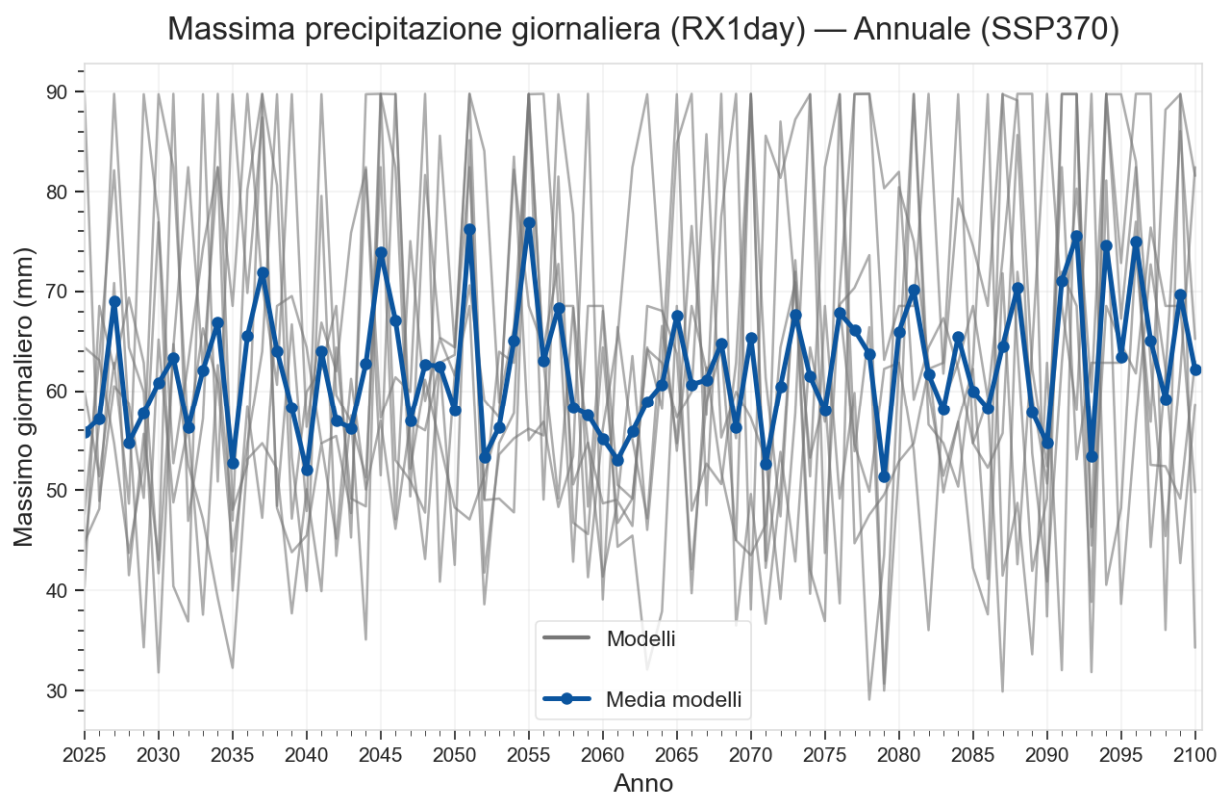


Figura 69: Massima precipitazione giornaliera (Milano CMIP6 3 7.0)

13.3 Trend eventi di pioggia intensa

L'analisi dei dati pluviometrici relativi all'area milanese negli ultimi vent'anni non evidenzia trend statisticamente significativi, né per quanto riguarda la precipitazione totale annuale né per la frequenza o l'intensità degli eventi piovosi estremi. Questo risultato, pur in apparente contrasto con alcune evidenze su scala più ampia, va interpretato alla luce di diversi fattori metodologici e climatici.

Innanzitutto, la lunghezza della serie temporale gioca un ruolo cruciale. Venti anni rappresentano un periodo relativamente breve per cogliere segnali climatici robusti, soprattutto in un contesto caratterizzato da una forte variabilità interannuale e decadale delle precipitazioni e da una progressiva variazione del sistema climatico. Gli eventi estremi, per loro natura, sono rari e irregolari nel tempo: ciò significa che l'identificazione di tendenze statisticamente significative richiede serie storiche lunghe, idealmente superiori ai 40-50 anni.

Un secondo elemento riguarda la densità e la distribuzione delle stazioni meteorologiche con cui poter fare confronti puntuali. L'analisi condotta su poche stazioni, anche se di lunga durata e qualità elevata, può non essere rappresentativa di aree urbane complesse come Milano, dove fenomeni locali – come l'effetto isola di calore urbana o le modifiche al regime del vento e dell'umidità – possono influenzare la formazione e lo sviluppo delle precipitazioni. In ambito urbano, anche variazioni microclimatiche su scala di pochi chilometri possono determinare differenze significative nei quantitativi registrati.

Infine, va considerata la complessità intrinseca dei processi fisici che determinano gli eventi di precipitazione intensa. Questi dipendono da un insieme di fattori atmosferici (instabilità convettiva, umidità, circolazione sinottica) che interagiscono in modo non lineare e non prevedibile in un dominio spaziale e temporale ridotto (qualche km, qualche ora).

Analogamente, anche l'analisi dei dataset di precipitazione dei modelli climatici regionali più avanzati mostrano limiti strutturali nella rappresentazione di eventi estremi localizzati, poiché la loro risoluzione spaziale e temporale non consente di simulare in modo accurato la dinamica convettiva su scala urbana.

In sintesi, l'assenza di un trend evidente nelle precipitazioni intense osservate o previste a Milano non implica la mancanza di variazioni climatiche in atto, ma riflette piuttosto i limiti osservativi e temporali della serie considerata, insieme alla natura intrinsecamente caotica dei fenomeni estremi. Analisi condotte su scala più ampia e con serie temporali più estese forniscono infatti indicazioni coerenti con un incremento dell'intensità delle precipitazioni, come illustrato nella letteratura scientifica recente, ma si riferiscono necessariamente a medie spaziali più ampie (scala regionale o continentale).

Un aspetto cruciale emerso da studi recenti riguarda non tanto la quantità totale di precipitazione, quanto la sua distribuzione temporale e intensità. Un segnale importante è stato evidenziato negli estremi di precipitazione sulla Penisola Italiana: il numero di giorni piovosi presenta un chiaro trend negativo su tutto il territorio italiano, con diminuzioni di circa 6 giorni per secolo nel Nord Italia e di 14 giorni per secolo nelle regioni centrali e meridionali (iv).

Parallelamente, l'intensità delle precipitazioni presenta un trend generalmente positivo, con valori e livelli di significatività variabili a seconda della regione. Si osserva una tendenza all'aumento dell'intensità media delle precipitazioni e una riduzione della loro durata (iv). Nel

lungo periodo si rileva anche una diminuzione significativa del numero di eventi di bassa intensità.

L'analisi event-based delle precipitazioni estreme in Italia utilizzando rianalisi ad alta risoluzione con risoluzione convettiva ha confermato trend significativi verso eventi più intensi (vii). Questo studio, utilizzando dati orari, ha permesso di caratterizzare con maggiore dettaglio l'evoluzione degli estremi di precipitazione, evidenziando come l'aumento dell'intensità sia particolarmente marcato per gli eventi di breve durata (vii).

Le precipitazioni torrenziali (superiori a 128 mm/giorno) che negli anni '50 contribuivano solo all'1% del totale delle precipitazioni italiane, negli anni '90 rappresentavano il 4-5% del totale, evidenziando un aumento di un fattore 4 (iv, v). Questa trasformazione nei pattern di precipitazione è particolarmente rilevante per le implicazioni idrologiche e di gestione del rischio.

L'effetto combinato dell'urbanizzazione e del cambiamento climatico sulle precipitazioni rappresenta una sfida particolare per le aree metropolitane. Studi globali hanno dimostrato che le aree urbane tendono a mostrare anomalie di precipitazione rispetto alle zone circostanti, con incrementi che possono variare significativamente in funzione delle caratteristiche dell'area urbana e del clima locale (xvi).

Per il Nord-Ovest Italia, l'approccio copula-based è stato applicato per predire l'impatto del cambiamento climatico sui sistemi di drenaggio urbano (i). Questo studio ha evidenziato come i sistemi di drenaggio progettati secondo i criteri storici potrebbero risultare sempre più inadeguati a fronte dell'intensificazione degli eventi di precipitazione estrema prevista per i prossimi decenni.

Gli eventi alluvionali dell'ottobre 2024 in Italia hanno mostrato chiaramente questa tendenza, con precipitazioni aumentate fino al 25% e venti più intensi del 10% rispetto al passato, in gran parte attribuibili al cambiamento climatico antropogenico (viii). L'analisi di questi eventi ha confermato che la variabilità naturale da sola non può spiegare i cambiamenti osservati nell'intensità delle precipitazioni e dei venti associati a condizioni meteorologiche eccezionali.

Il trend verso una maggiore concentrazione delle precipitazioni in eventi intensi, combinato con l'aumento dei periodi di siccità, configura uno scenario di "tropicalizzazione" del clima italiano, con conseguenze significative per la gestione delle risorse idriche e il rischio idrogeologico. Per l'area milanese e più in generale per il Nord Italia, le implicazioni per la pianificazione territoriale e la gestione delle risorse idriche sono quindi significative, richiedendo strategie di adattamento che tengano conto sia della maggiore intensità degli eventi di precipitazione sia dell'aumento dei periodi siccitosi (vi, xxi).

13.4 Siccità e stress idrico

Per l'analisi degli eventi di siccità si è indagato il numero massimo di giorni consecutivi senza pioggia (CDD). Tale indicatore è utile per analizzare la persistenza della siccità, gli impatti agricoli o idrici in un'area o stress per gli ecosistemi.

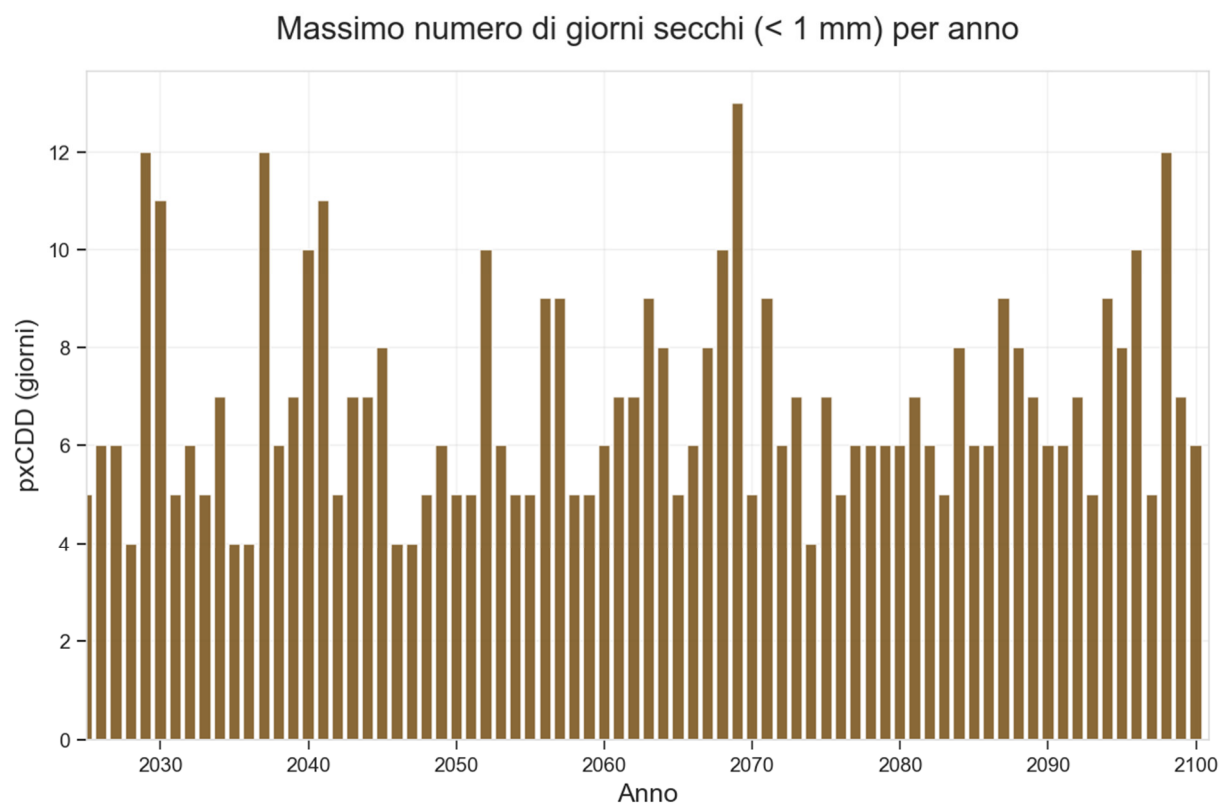


Figura 70: Numero massimo giorni secchi consecutivi (Milano CMIP6 3 7.0)

Rispetto a questo indicatore, non appare evidente una specifica tendenza (Figura 69), la lunghezza massima delle sequenze secche non mostra un trend significativo nel periodo analizzato: le variazioni anno per anno rientrano nella variabilità naturale della serie.

Di seguito si riporta l'analisi per stagione meteorologica (Figura 71). Analogamente all'analisi annuale, non si evincono trend statisticamente significativi ad eccezione per l'estate, dove l'analisi evidenzia un trend rilevabile con impatto contenuto ma misurabile, segnale di un maggiore rischio di siccità prolungata.

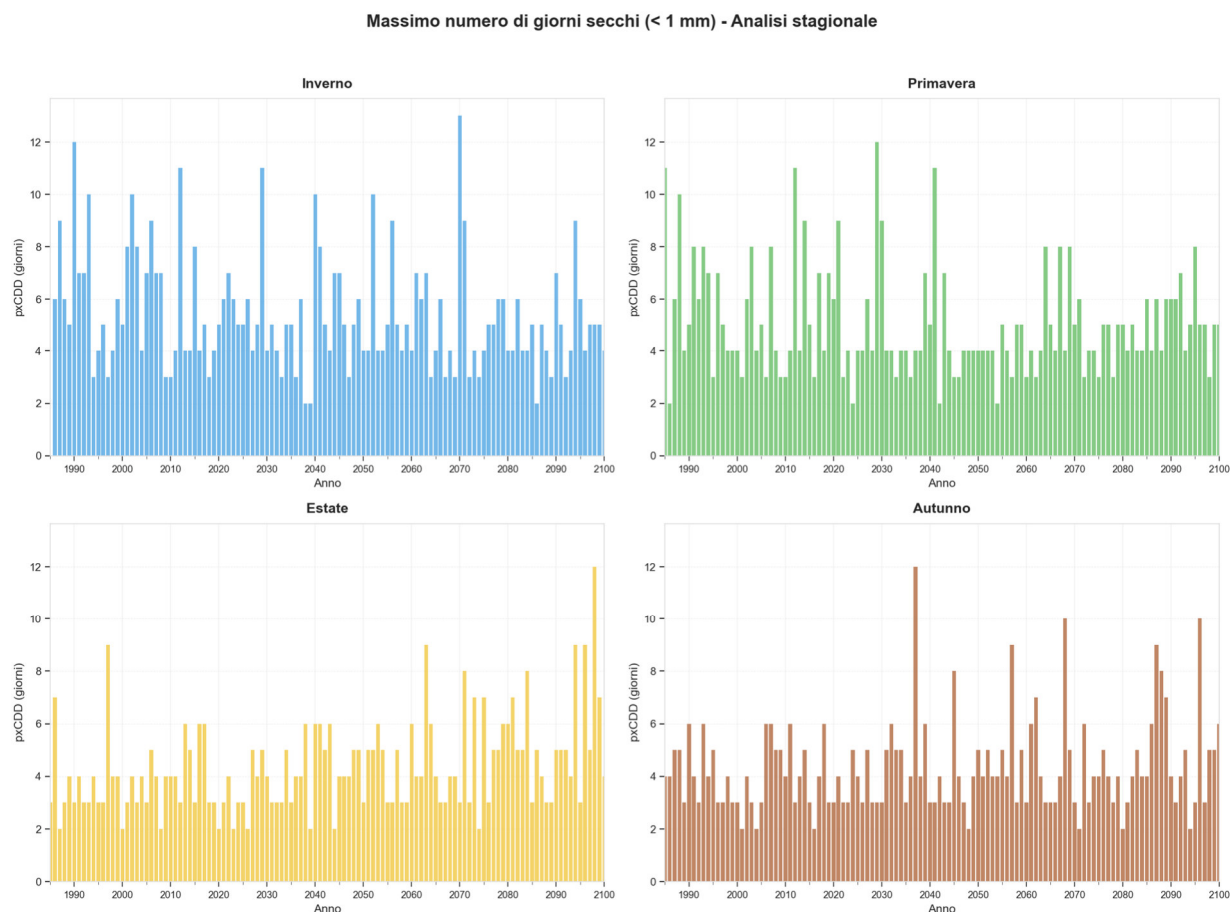


Figura 71: Numero massimo giorni secchi consecutivi (Milano CMIP6 3 7.0)

Poiché la siccità è un fenomeno complesso che non può essere descritto semplicemente con il numero di giorni consecutivi senza pioggia, analogamente a quanto fatto per i dati storici è stato analizzato anche lo **Standardized Precipitation Index (SPI)**. Questo indicatore è stato sviluppato per valutare le anomalie delle precipitazioni rispetto alla media storica in una determinata regione e su differenti scale temporali. A differenza del PXCDD, che fornisce solo una misura della durata di un periodo secco, l'SPI permette di determinare quanto un periodo sia più secco (o più piovoso) rispetto alla norma climatologica, rendendolo particolarmente utile per l'analisi dei trend a lungo termine.

In questo caso si è elaborato l'indicatore SPI con riferimento a 6 e 12 mesi.

L'**SPI-6** analizza l'andamento delle precipitazioni su un periodo più lungo, offrendo una visione della siccità agricola e degli effetti sulla disponibilità di risorse idriche superficiali, come fiumi e laghi. Questo indicatore è utile per comprendere le tendenze stagionali e valutare l'accumulo o la carenza di pioggia nel corso di più mesi, permettendo una migliore gestione dell'irrigazione e delle risorse idriche.

L'**SPI-12** valuta l'andamento delle precipitazioni su base annuale, fornendo una misura della siccità idrologica di lungo periodo. Questo indicatore consente di analizzare l'impatto delle variazioni pluviometriche su falde acquifere, bacini e riserve idriche, evidenziando trend climatici persistenti. È particolarmente utile per studiare gli effetti dei cambiamenti climatici sulla disponibilità complessiva di risorse idriche e supportare la pianificazione strategica a livello di gestione idrica e territoriale.

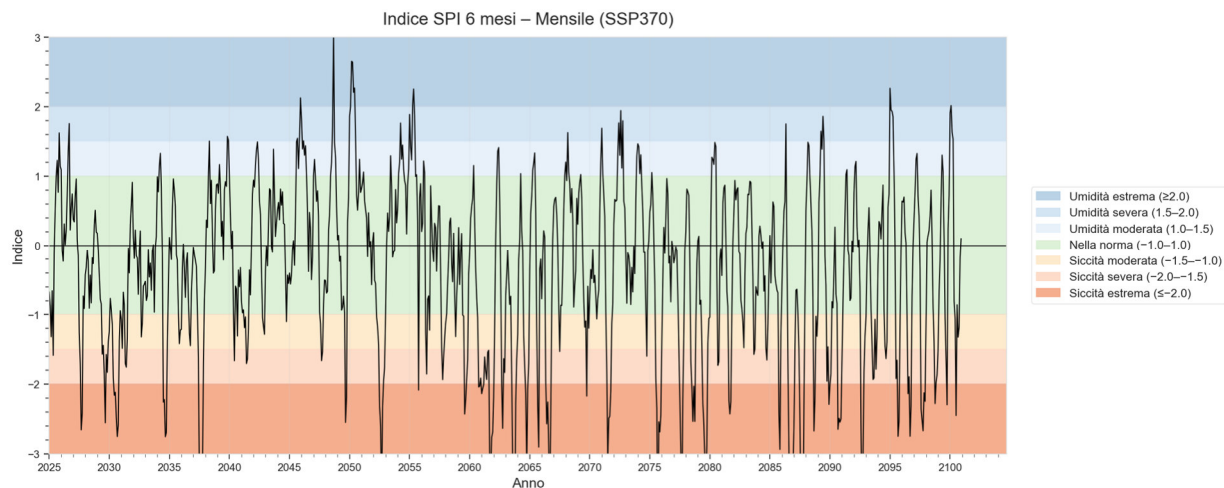


Figura 72: SPI a 6 mesi (Milano CMIP6 3 7.0)

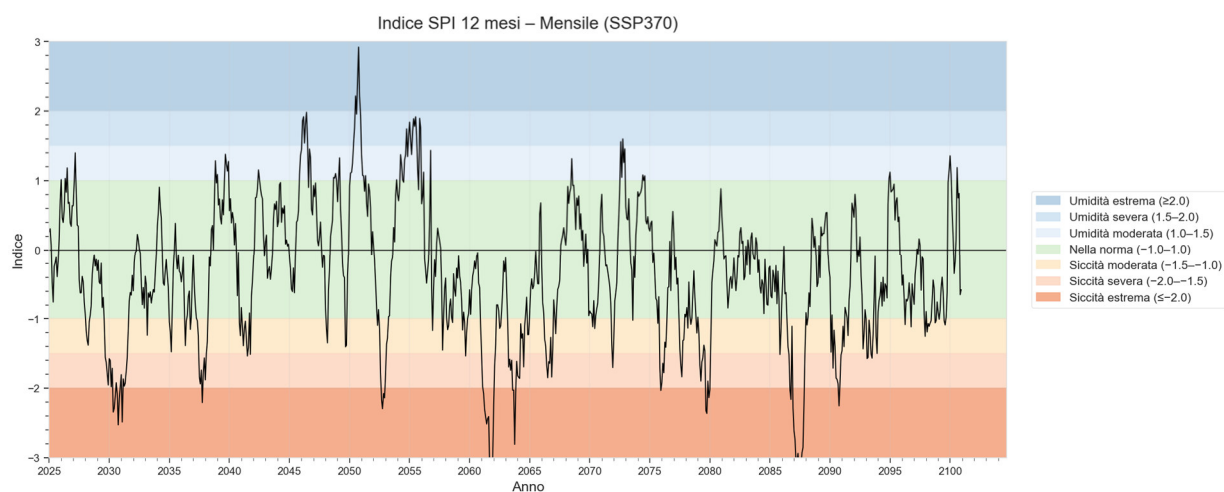


Figura 73: SPI a 12 mesi (Milano CMIP6 3 7.0)

Analizzando in particolare l'indice SPI a 12 mesi, il grafico (Figura 73) mostra una forte variabilità interannuale, con oscillazioni frequenti tra fasi umide e secche.

Nei primi decenni (2025–2055) si alternano periodi di umidità marcata e siccità severa, ma con tendenza generale alla neutralità (valori oscillanti intorno a 0). Dopo il 2055, compaiono fasi più persistenti di siccità severa o estrema ($SPI < -1.5$), in particolare tra 2060 e 2080, segno di un possibile indebolimento delle precipitazioni annuali o di una maggiore irregolarità.

Negli ultimi vent'anni (2080–2100) l'indice mostra una leggera ripresa, ma senza tornare alla stabilità dei primi decenni: persistono episodi secchi pronunciati alternati a brevi fasi umide.

La frequenza e la durata delle fasi di siccità prolungata tendono ad aumentare nel corso del secolo, coerentemente con le proiezioni di scenario SSP3-7.0, caratterizzato da alte emissioni e stress idrico crescente. Le fasi umide estreme restano presenti ma più episodiche, indicando una maggiore variabilità piuttosto che un semplice spostamento verso condizioni più secche.

Questo comportamento è indicativo di un clima più instabile, con alternanza di eventi piovosi intensi e periodi prolungati di deficit idrico.

Si è approfondita l'analisi utilizzando anche l'indicatore SPEI (**Standardized Precipitation and Evapotranspiration Index**) che è un indicatore climatico che estende il concetto dello SPI, includendo non solo le precipitazioni ma anche l'evapotraspirazione potenziale (PET), che lo rende particolarmente utile per valutare la siccità in un contesto di cambiamento climatico, dove l'aumento delle temperature può intensificare la perdita di umidità dal suolo e dalla vegetazione¹¹.

In questo caso è stato elaborato l'indicatore a 6 e a 12 mesi.

Nell'ambito del presente studio si sono adottate le indicazioni della World Meteorological Organization (WMO) per la classificazione delle fasce di siccità e umidità, al fine di garantire la coerenza con gli standard internazionali nella valutazione delle condizioni climatiche, classificando i valori di SPI o SPEI in categorie di siccità o umidità secondo soglie standard che facilitano il confronto tra periodi e regioni.

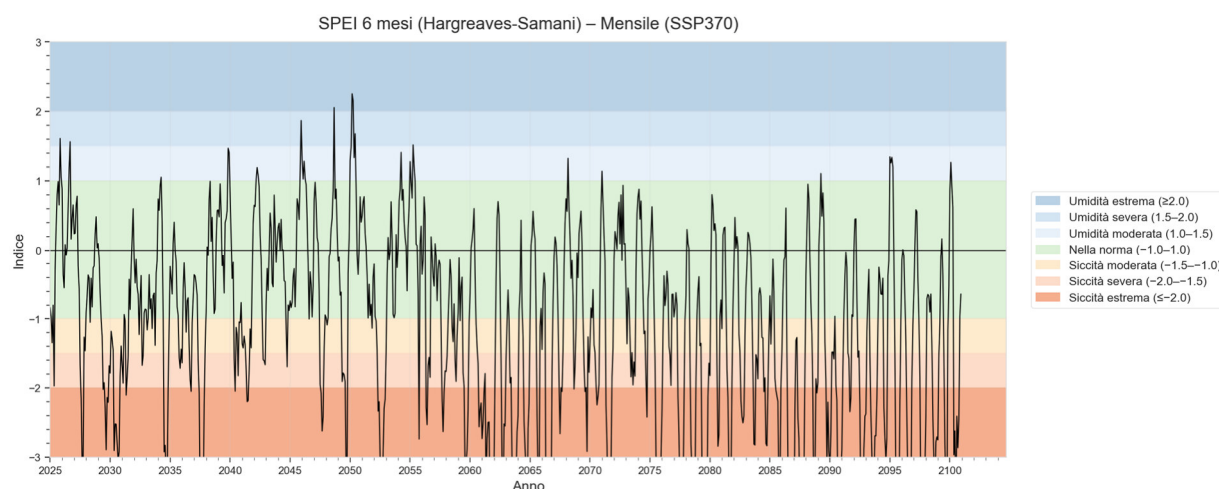
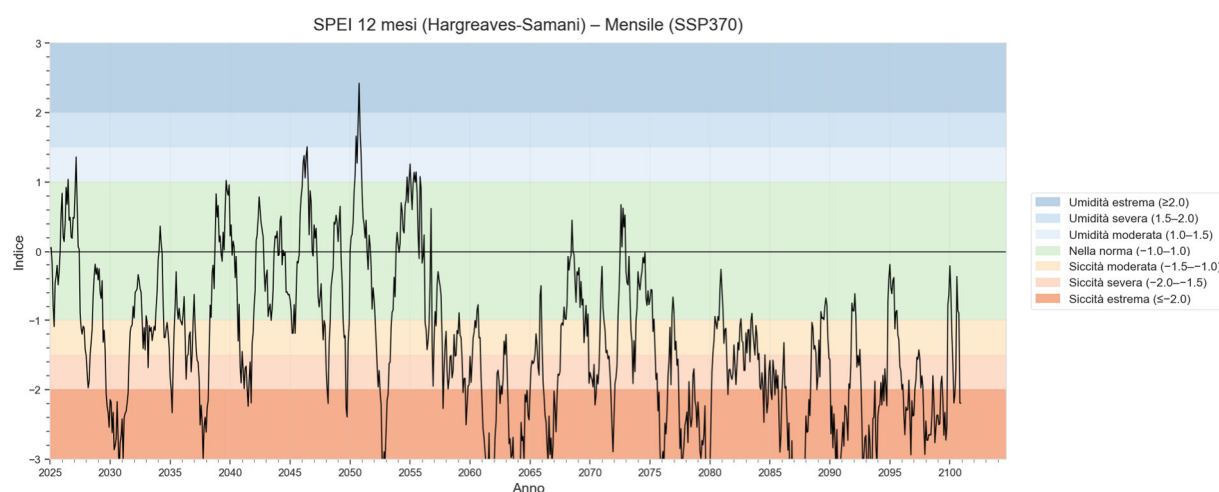


Figura 74: SPEI a 6 mesi (Milano CMIP6 3.7.0)



¹¹ Nell'ambito del presente studio per il calcolo dell'indice SPIE è stata utilizzata la formula di Hargreaves-Samani. Questo metodo è generalmente considerato più adatto quando si dispone solo di temperature e precipitazioni perché, oltre alla temperatura media, utilizza anche l'escursione termica giornaliera e la radiazione solare extraterrestre, fornendo una stima della PET più fisicamente realistica e meno distorta sotto variazioni climatiche.

Figura 75: SPEI a 12 mesi (Milano CMIP6 3 7.0)

Analizzando anche in questo caso l'indice a 12 mesi, fino alla metà del secolo (circa 2025–2055) l'indice mostra oscillazioni attorno alla norma, con alternanza di fasi umide e secche. Dopo il 2055, si osserva un progressivo spostamento verso valori negativi, con periodi sempre più frequenti e prolungati di siccità severa o estrema ($SPEI < -1.5$). Nella parte finale del secolo (2080–2100), l'indice rimane stabilmente sotto la soglia di normalità, indicando un nuovo equilibrio climatico più secco rispetto al periodo di riferimento.

L'analisi dell'SPEI-12 evidenzia come, nello scenario SSP3-7.0, il bilancio idrico annuale tenda a deteriorarsi progressivamente dopo la metà del secolo. L'indice, calcolato rispetto al periodo di riferimento climatico (1985-2014), mostra valori sempre più negativi a causa dell'aumento dell'evapotraspirazione legata al riscaldamento climatico, segnalando **una condizione di siccità cronica e un clima strutturalmente diverso da quello del passato.**

14 ANDAMENTO INDICATORI

Per comprendere meglio come il clima di Milano potrà evolvere nei prossimi decenni, è utile non fermarsi ai singoli valori annuali ma considerare indicatori climatici sintetici, calcolati su periodi temporali omogenei. Questo approccio permette di evidenziare in modo più chiaro le differenze tra il clima di riferimento osservato nel passato recente e le condizioni attese nel futuro, distinguendo tra intervalli di medio e lungo termine.

Il ricorso agli indicatori offre un quadro più leggibile delle tendenze, utile non solo per pianificare azioni di adattamento e interventi urbani, ma anche per valutare quanto aumenta il livello di pericolo associato ai differenti fenomeni climatici. Questi dati rappresentano quindi uno strumento di verifica climatica indispensabile per aggiornare piani di emergenza, standard di progettazione e misure di resilienza, rendendo le strategie locali coerenti con gli scenari di rischio attesi nei prossimi decenni.

Di seguito si riepilogano graficamente e in forma tabellare gli andamenti dei diversi indicatori sopra illustrati, con riferimento ai periodi di riferimento storico (1985-2014), al periodo di futuro prossimo (2041-2070) e agli scenari di fine secolo (2071-2100).

14.1 Indicatori cambiamento della temperatura

Di seguito si riportano le elaborazioni riguardanti la variazione dei principali indicatori legati alla temperatura.

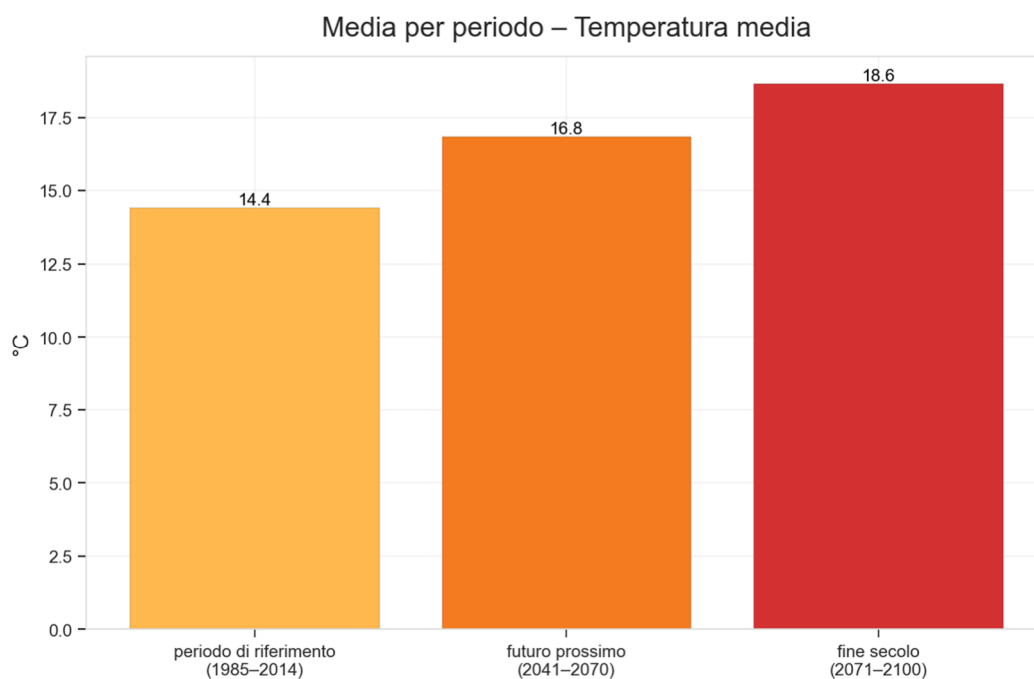


Figura 76: Variazione temperatura media annuale

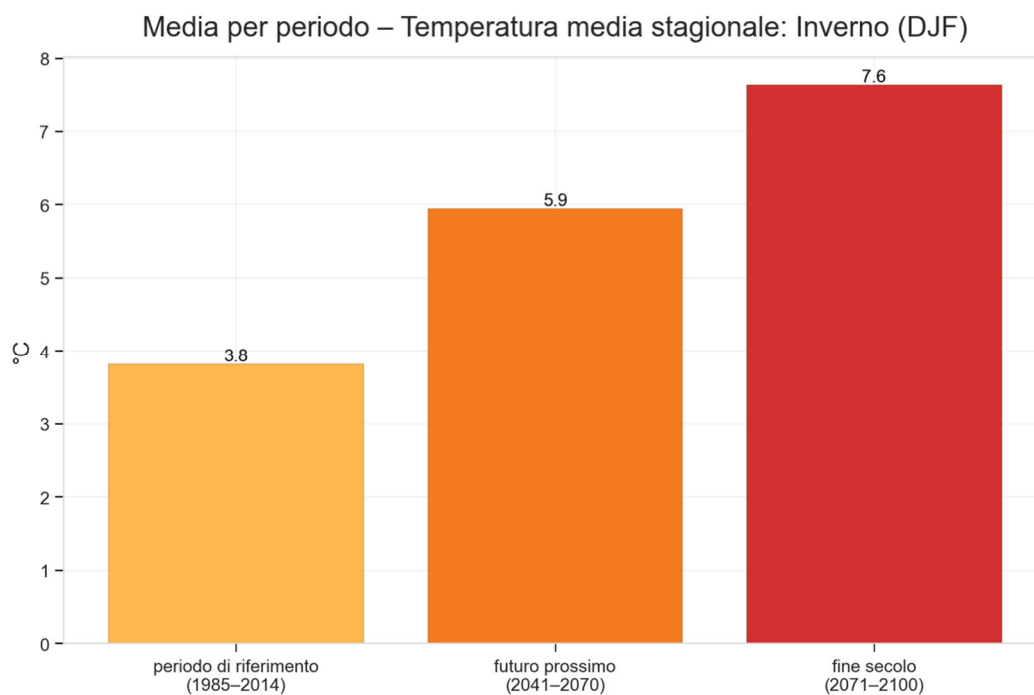


Figura 77: Variazione temperatura media invernale

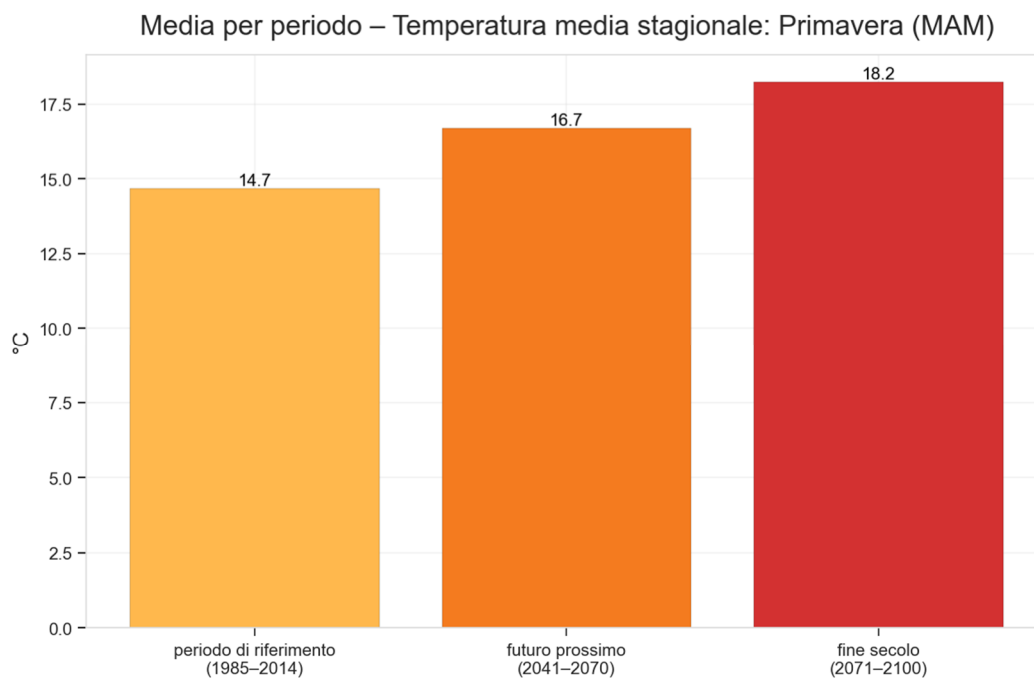


Figura 78: Variazione temperatura media primaverile

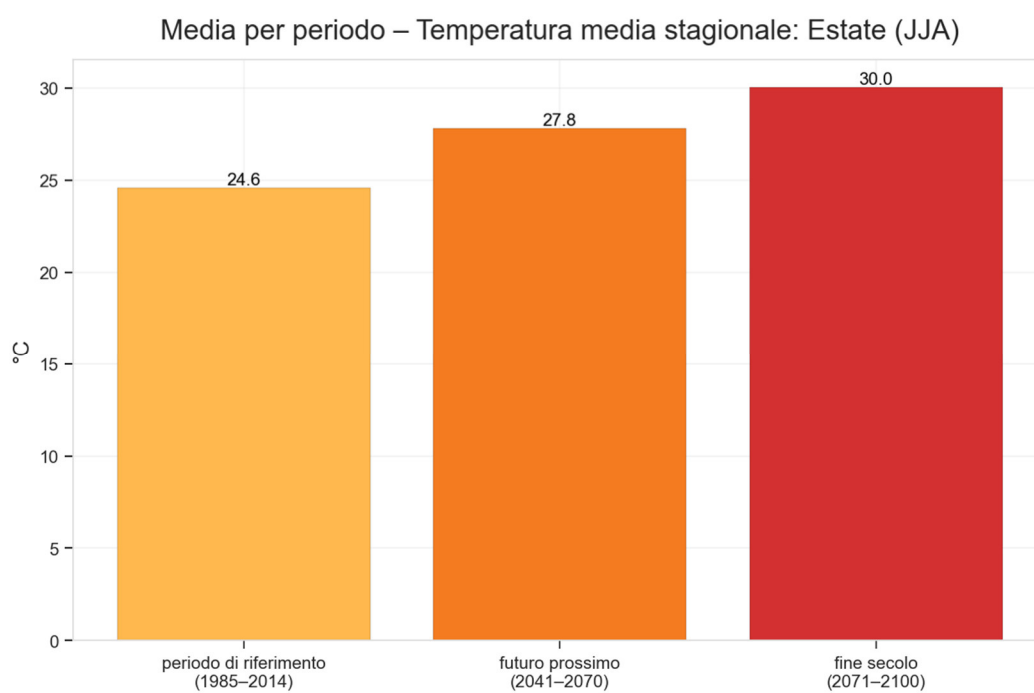


Figura 79: Variazione temperatura media estiva

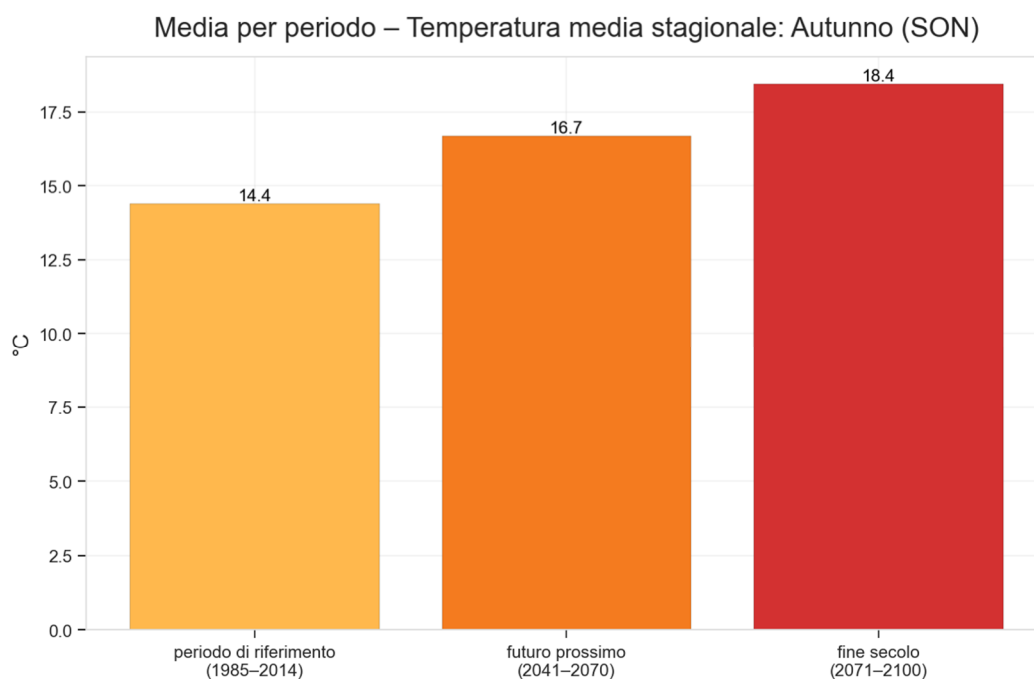


Figura 80: Variazione temperatura media autunnale

Indice	Periodo	Valore medio periodo
Temperatura media	Riferimento 1985-2014	14.4
Temperatura media	Futuro prossimo 2041-2070	16.8
Temperatura media	Fine secolo 2071-2100	18.6
Temperatura minima media	Riferimento 1985-2014	10.3
Temperatura minima media	Futuro prossimo 2041-2070	12.5
Temperatura minima media	Fine secolo 2071-2100	14.3
Temperatura massima media	Riferimento 1985-2014	18.6
Temperatura massima media	Futuro prossimo 2041-2070	21.1
Temperatura massima media	Fine secolo 2071-2100	23.0
Temperatura media (inverno)	Riferimento 1985-2014	3.8
Temperatura media (inverno)	Futuro prossimo 2041-2070	5.9
Temperatura media (inverno)	Fine secolo 2071-2100	7.6
Temperatura media (primavera)	Riferimento 1985-2014	14.7
Temperatura media (primavera)	Futuro prossimo 2041-2070	16.7
Temperatura media (primavera)	Fine secolo 2071-2100	18.2
Temperatura media (estate)	Riferimento 1985-2014	24.6
Temperatura media (estate)	Futuro prossimo 2041-2070	27.8
Temperatura media (estate)	Fine secolo 2071-2100	30.0
Temperatura media (autunno)	Riferimento 1985-2014	14.4
Temperatura media (autunno)	Futuro prossimo 2041-2070	16.7
Temperatura media (autunno)	Fine secolo 2071-2100	18.4

Tabella 1: Confronto parametri climatici: temperature

14.2 Indicatori stress termico

Di seguito si riportano le elaborazioni riguardanti la variazione dei principali indicatori legati allo stress termico.

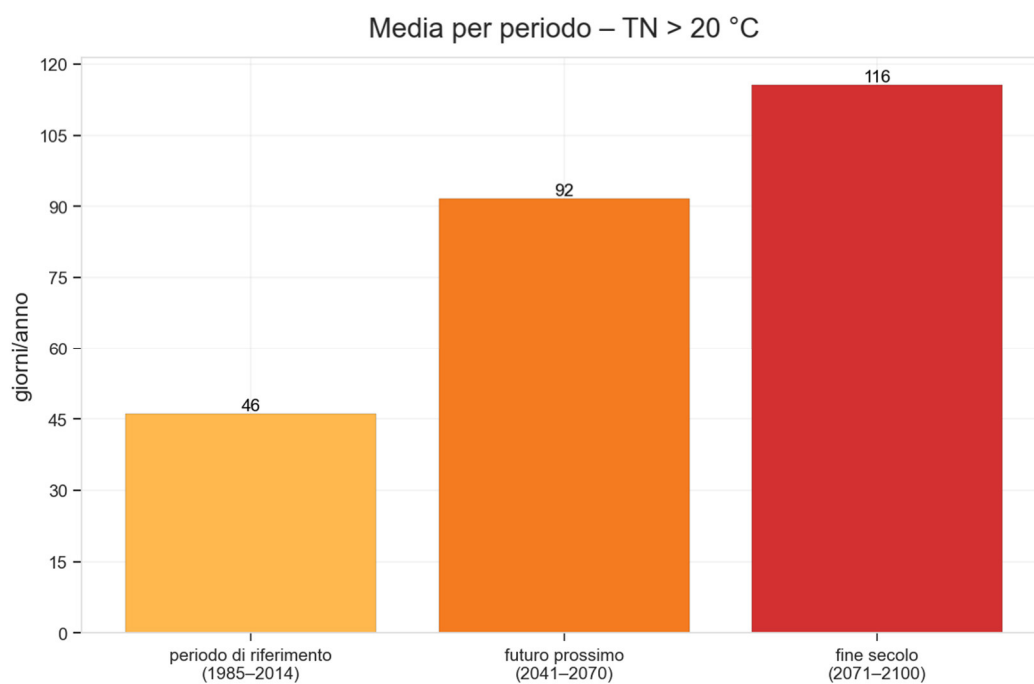


Figura 81: Variazione notti tropicali ($T_{min} > 20\text{ °C}$)

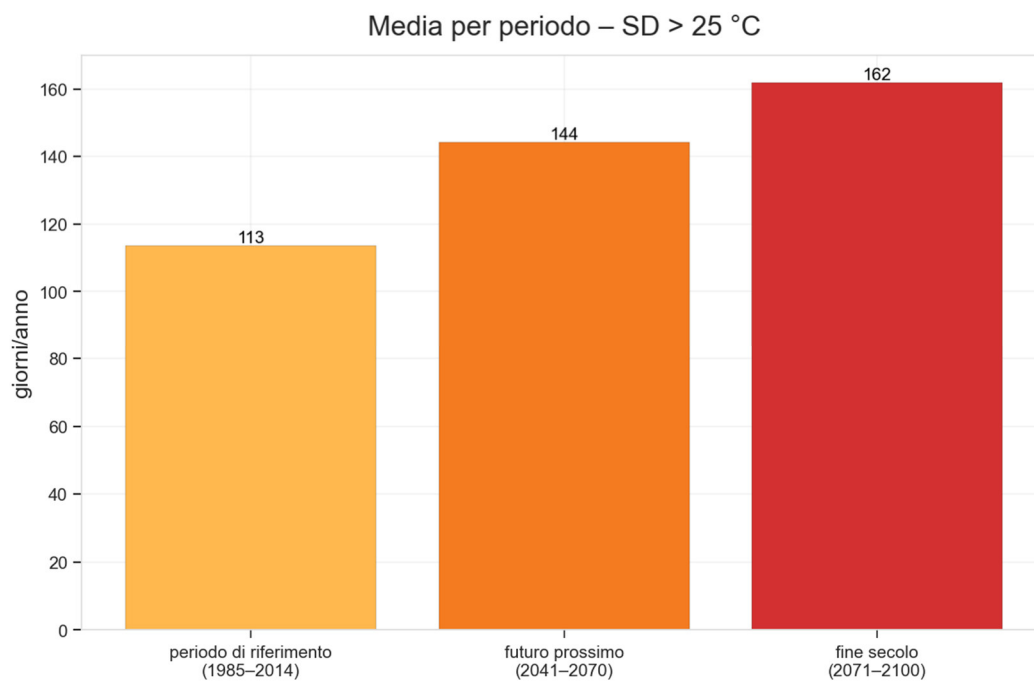


Figura 82: Variazione giorni estivi ($T_{max} > 25\text{ °C}$)

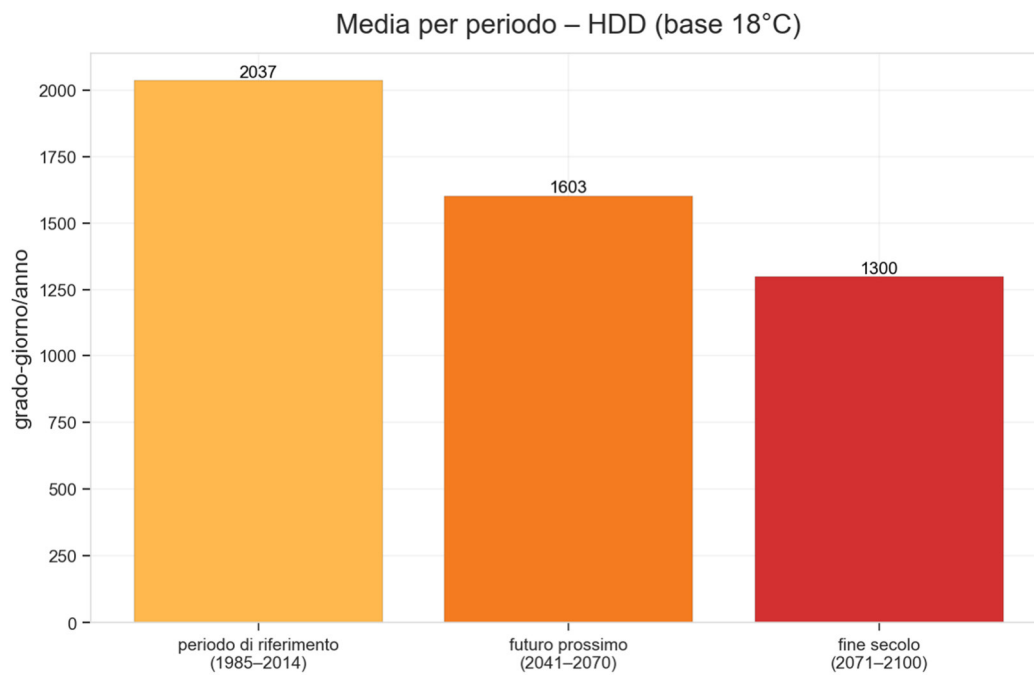


Figura 83: Variazione Gradi Giorno di riscaldamento

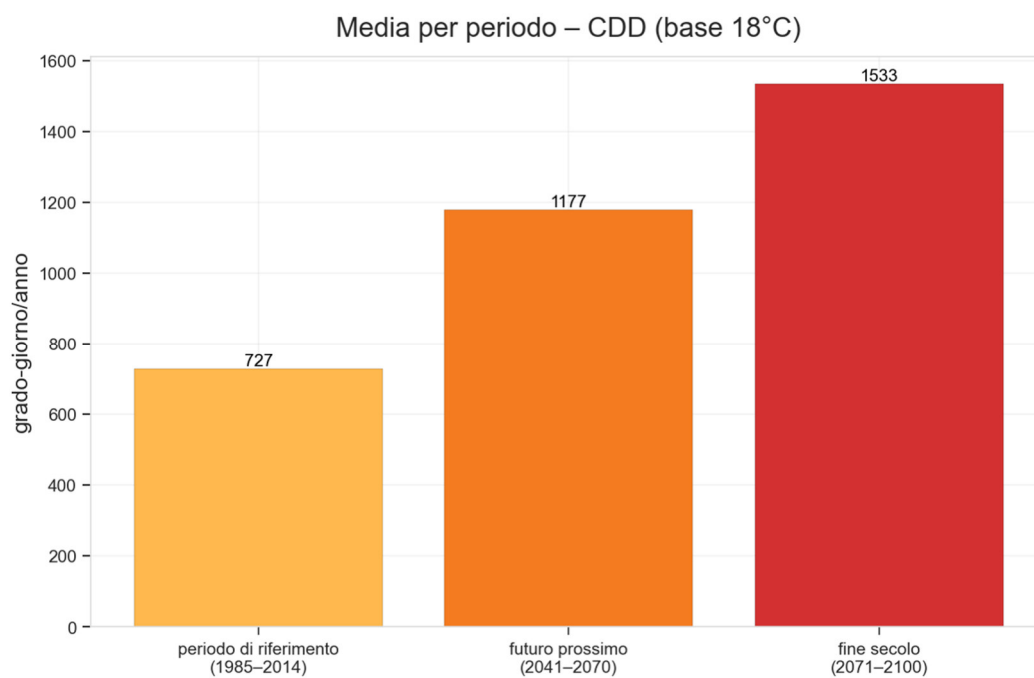


Figura 84: Variazione gradi giorno di raffrescamento

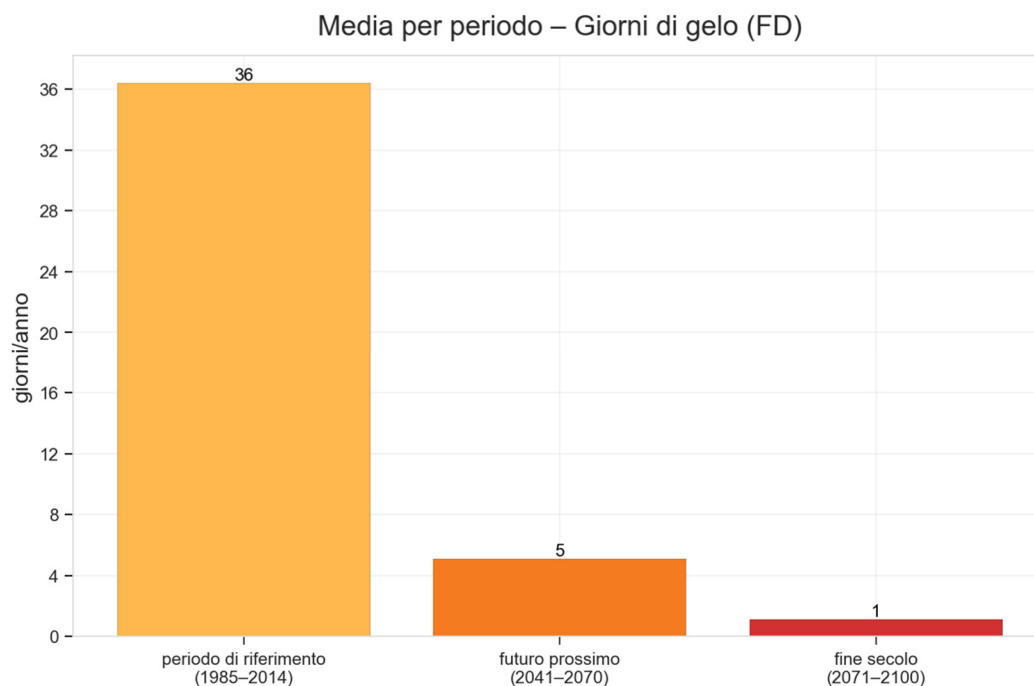


Figura 85: Variazione giorni di gelo ($t_{min} < 0\text{ °C}$)

Indice	Periodo	Valore medio periodo
TN > 20 °C (giorni/anno)	Riferimento 1985-2014	46
TN > 20 °C (giorni/anno)	Futuro prossimo 2041-2070	92
TN > 20 °C (giorni/anno)	Fine secolo 2071-2100	116
SD > 25 °C (giorni/anno)	Riferimento 1985-2014	113
SD > 25 °C (giorni/anno)	Futuro prossimo 2041-2070	144
SD > 25 °C (giorni/anno)	Fine secolo 2071-2100	162
FD (giorni/anno)	Riferimento 1985-2014	36
FD (giorni/anno)	Futuro prossimo 2041-2070	5
FD (giorni/anno)	Fine secolo 2071-2100	1
HDD (base 18 °C)	Riferimento 1985-2014	2037
HDD (base 18 °C)	Futuro prossimo 2041-2070	1603
HDD (base 18 °C)	Fine secolo 2071-2100	1300
CDD (base 18 °C)	Riferimento 1985-2014	727
CDD (base 18 °C)	Futuro prossimo 2041-2070	1177
CDD (base 18 °C)	Fine secolo 2071-2100	1533

Tabella 2: Confronto parametri climatici: stress termico

Per quanto riguarda l'indicatore WSDI, come illustrato un giorno è incluso nel calcolo del WSDI se la sua temperatura massima giornaliera supera la soglia del 90° percentile delle temperature massime storiche registrate per quello specifico giorno dell'anno, calcolate su un periodo di riferimento climatico standard (in questo caso il trentennio 1985-2014). La condizione essenziale per la rilevanza climatica è che tale superamento del 90° percentile avvenga per almeno sei giorni consecutivi. Il WSDI, quindi, rappresenta il numero totale di giorni in un anno che soddisfano questo criterio di caldo eccezionale e persistente rispetto al periodo di climatico di riferimento.

Come ben illustrato nella seguente Figura 86, questo indicatore è destinato ad un drastico aumento nei prossimi anni.

Al di là dei valori, il significato reale è che l'indicatore è nato per descrivere le ondate di caldo nel contesto di un clima "stabile", dove gli estremi erano eccezioni. Dai dati proiettati verso la fine del secolo il caldo estremo non è più un'anomalia, ma la condizione di base.

Il clima futuro non sarà semplicemente una versione più calda di quello che conosciamo — sarà un clima diverso.

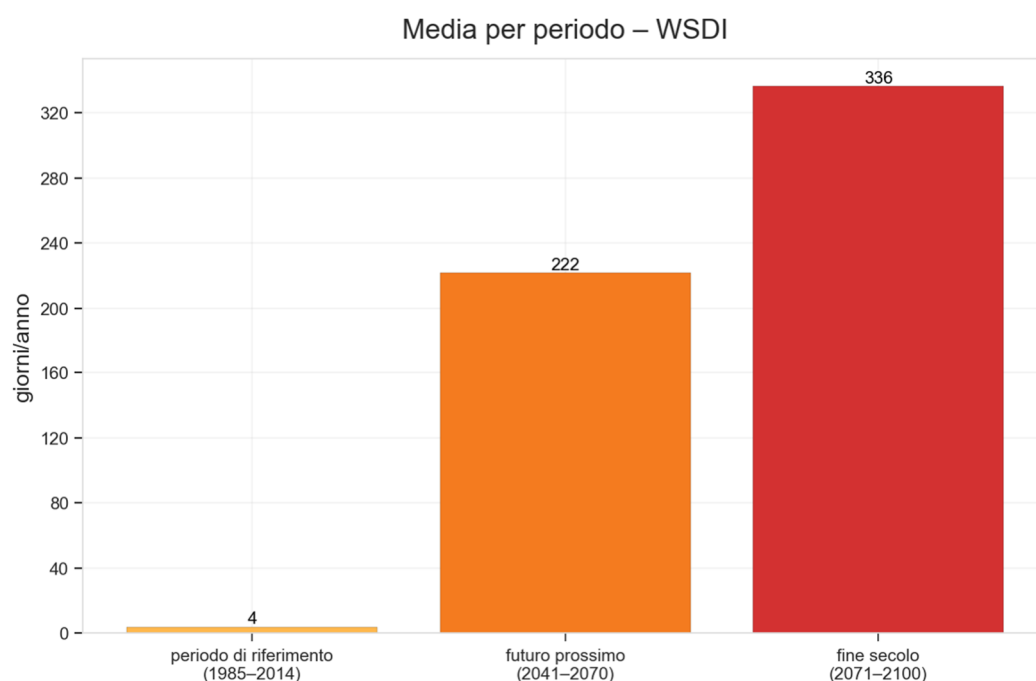
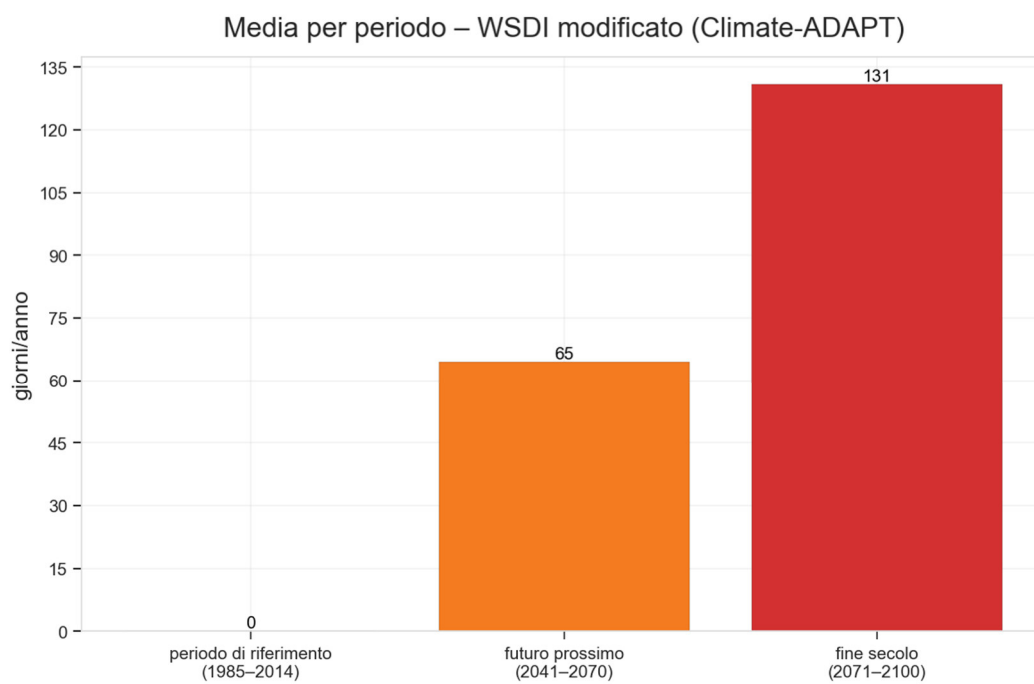


Figura 86: Variazione WSDI

Partendo da questa constatazione, nell'ambito dello studio si è indagato un indicatore WSDI "modificato", ovvero analizzando le ondate di calore solo nel periodo tra maggio e settembre che hanno presentato per almeno 3 giorni consecutivi il superamento del 99° percentile, ovvero di un valore superato solo dall'1% delle osservazioni storiche, secondo quanto viene definito nell'ambito del progetto Climate-Adapt come "Climatological Heatwave Days"¹².

Anche in questo caso l'informazione è che verso fine secolo praticamente tutti i giorni del periodo mostreranno temperature massime che oggi definiremmo estremamente rare.

¹² climate-adapt.eea.europa.eu/en/metadata/indicators/climatological-heatwave-days



Climate-ADAPT: 99° percentile, ≥ 3 giorni consecutivi, maggio-settembre

Figura 87: Variazione WSDI modificato

14.1 Indicatori precipitazione

Di seguito si riportano le elaborazioni riguardanti la variazione dei principali indicatori legati alle precipitazioni. Si riportano solo i grafici relativi alla precipitazione totale in quanto, come si può vedere alla Tabella 3, i vari indicatori specifici mostrano variazioni molto contenute.

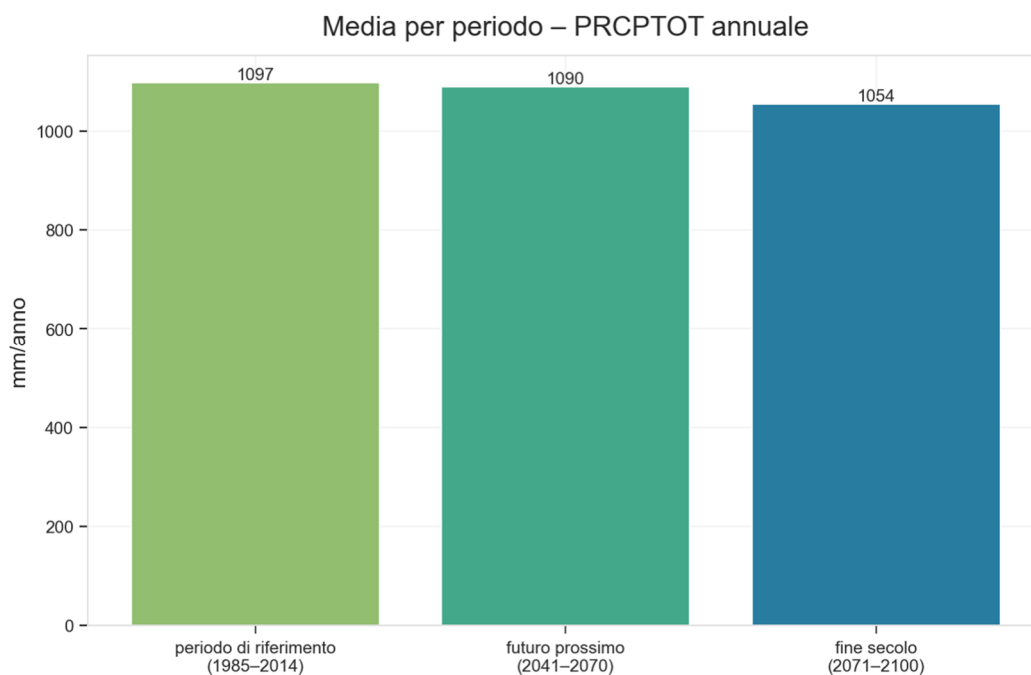


Figura 88: Variazione precipitazione totale annuale

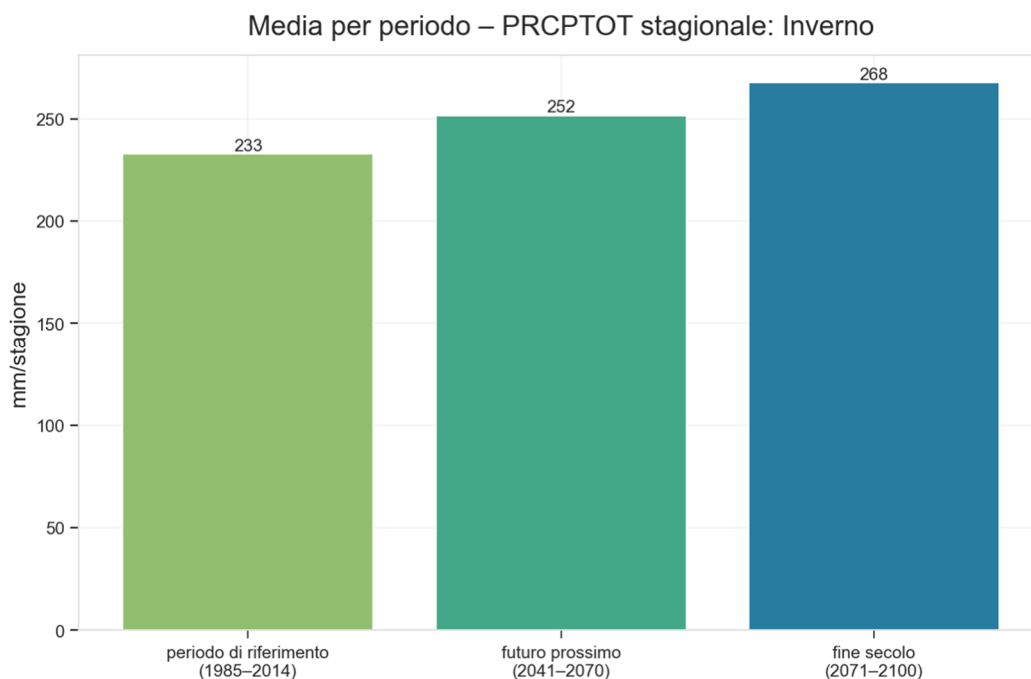


Figura 89: Variazione precipitazione totale invernale

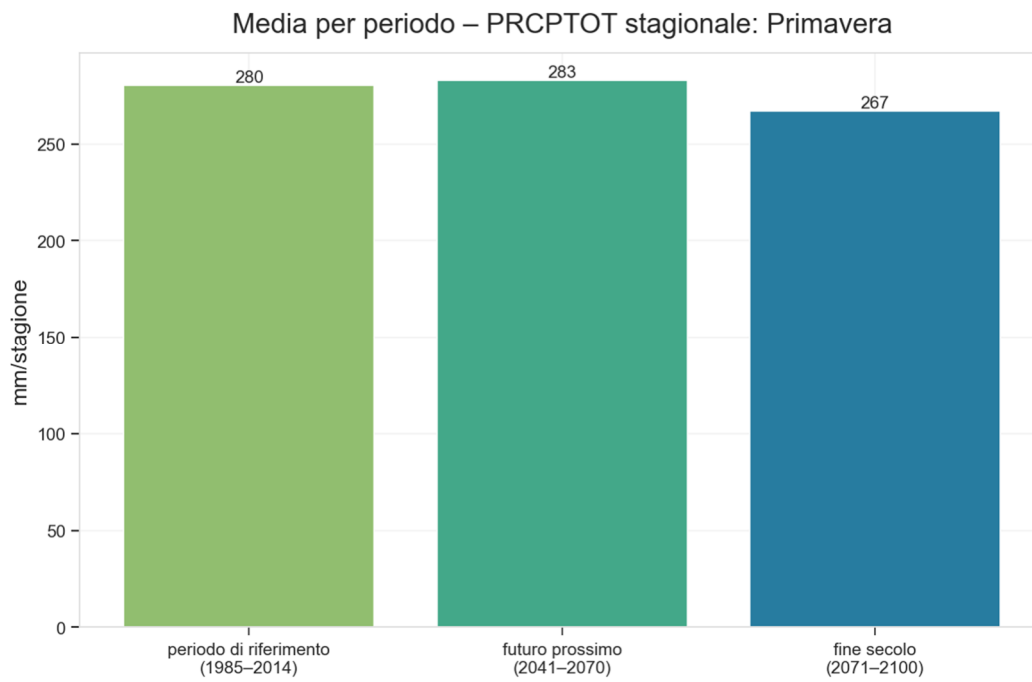


Figura 90: Variazione precipitazione totale primaverile

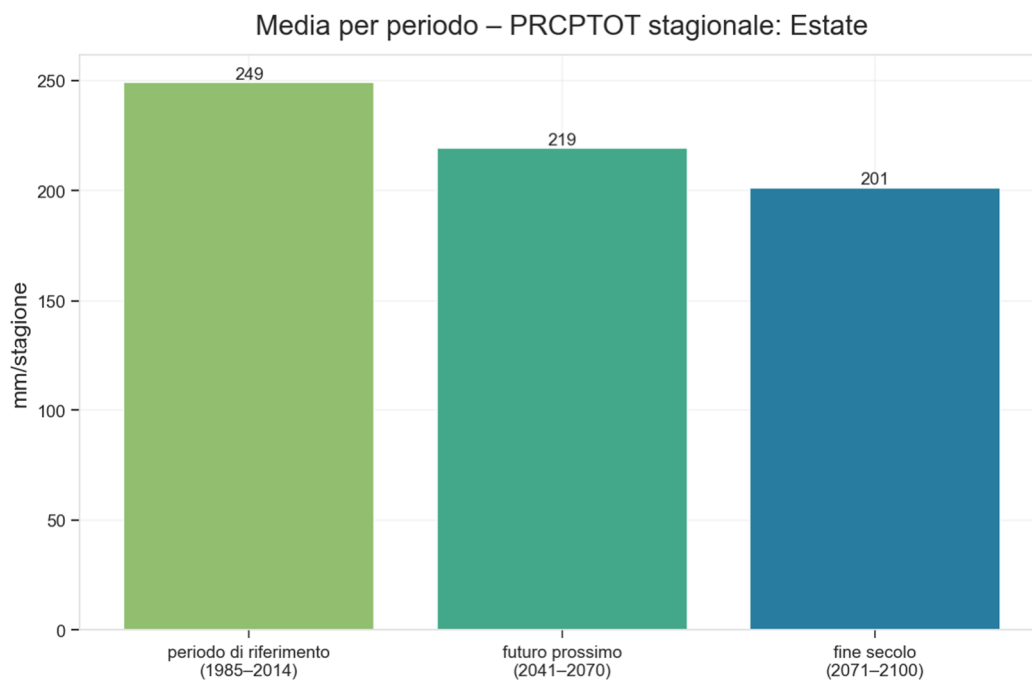


Figura 91: Variazione precipitazione totale estiva

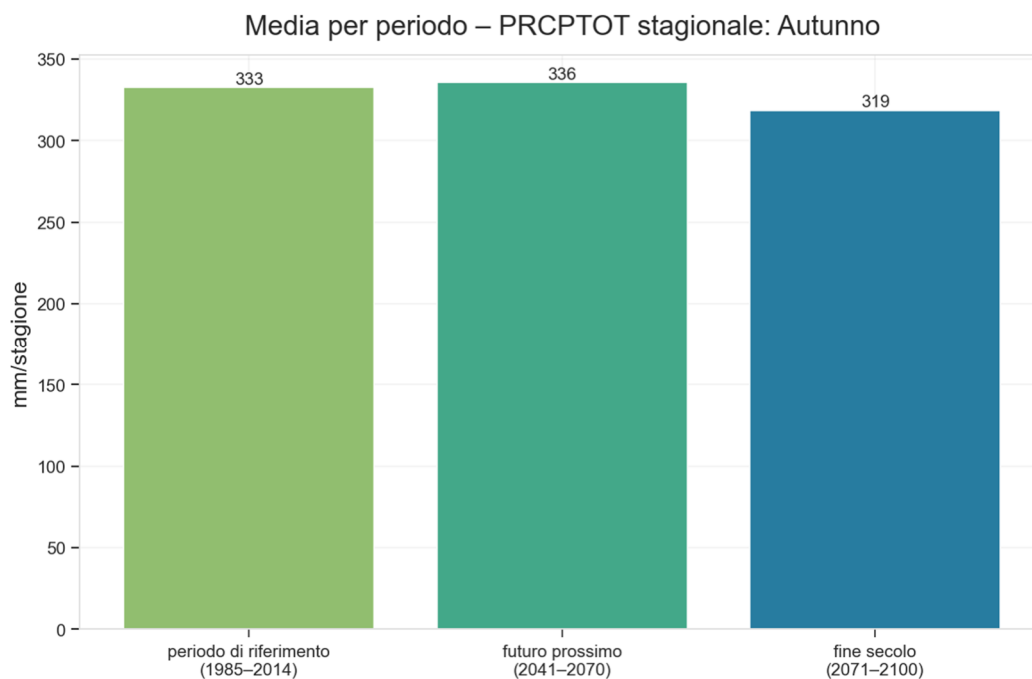


Figura 92: Variazione precipitazione totale autunnale

Indice	Periodo	Valore medio periodo
PRCPTOT annuale	Riferimento 1985-2014	1097
PRCPTOT annuale	Futuro prossimo 2041-2070	1090
PRCPTOT annuale	Fine secolo 2071-2100	1054
PRCPTOT stagionale (inverno)	Riferimento 1985-2014	233
PRCPTOT stagionale (inverno)	Futuro prossimo 2041-2070	252
PRCPTOT stagionale (inverno)	Fine secolo 2071-2100	268
PRCPTOT stagionale (primavera)	Riferimento 1985-2014	280
PRCPTOT stagionale (primavera)	Futuro prossimo 2041-2070	283
PRCPTOT stagionale (primavera)	Fine secolo 2071-2100	267
PRCPTOT stagionale (estate)	Riferimento 1985-2014	249
PRCPTOT stagionale (estate)	Futuro prossimo 2041-2070	219
PRCPTOT stagionale (estate)	Fine secolo 2071-2100	201
PRCPTOT stagionale (autunno)	Riferimento 1985-2014	333
PRCPTOT stagionale (autunno)	Futuro prossimo 2041-2070	336
PRCPTOT stagionale (autunno)	Fine secolo 2071-2100	319
R20	Riferimento 1985-2014	13.1
R20	Futuro prossimo 2041-2070	13.7
R20	Fine secolo 2071-2100	13.7
Rx1day	Riferimento 1985-2014	57.2
Rx1day	Futuro prossimo 2041-2070	61.9
Rx1day	Fine secolo 2071-2100	63.5
pxCDD	Riferimento 1985-2014	7.4
pxCDD	Futuro prossimo 2041-2070	6.8
pxCDD	Fine secolo 2071-2100	6.8

Tabella 3: Confronto parametri climatici: precipitazioni

15 CONCLUSIONI SULLA VARIABILITA' CLIMATICA PREVISTA

L'analisi degli indici ed indicatori climatici futuri è basata sull'elaborazione dei modelli dello scenario SPP 3-7.0, che è ormai un riferimento consolidato per le valutazioni in ambito di pianificazione e progettazione territoriale. Inoltre, per questo scenario, disponiamo di un dataset di proiezioni climatiche sicuramente all'avanguardia dal punto di vista metodologico e ad una scala di rappresentatività sufficientemente piccola per cogliere i segnali climatici attesi nel territorio metropolitano.

Il risultato delle analisi evidenzia come, rispetto al periodo di riferimento 1985-2014, sia previsto un aumento delle temperature e di tutti gli indici ad essi collegati, in particolare:

- La temperatura media attorno al 2050 avrà un aumento di 2,4 °C, arrivando a 4,2 °C a fine secolo rispetto al periodo di riferimento
- L'aumento maggiore di temperatura sarà nel periodo estivo, dove la temperatura media passerà da 24,6 °C nel periodo di riferimento a 30,0 °C di temperatura media a fine secolo (cfr. Figura 79).

In estrema sintesi, la temperatura media annuale del periodo storico diventerà la temperatura minima media a fine secolo, mentre la temperatura massima media annuale sarà la nuova media.

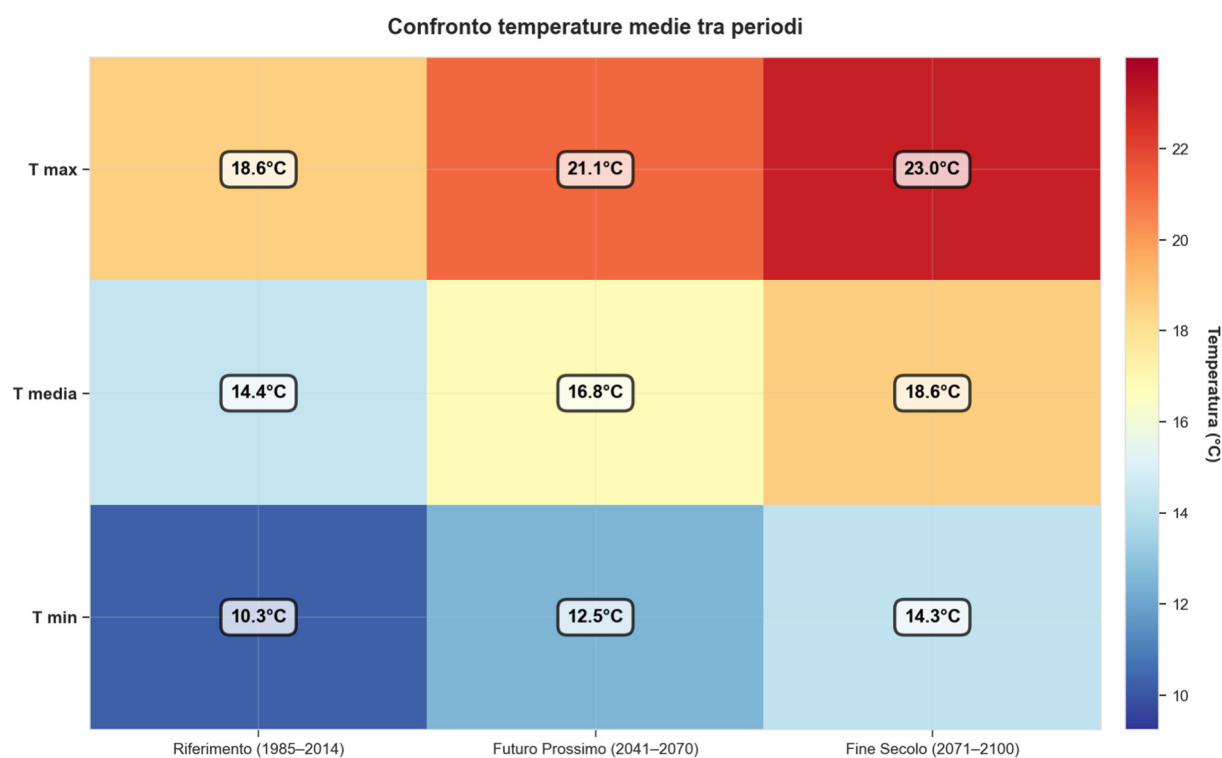


Figura 93: Evoluzione temperature medie annuali (Milano CMIP6 3 7.0)

Questo spostamento verso l'alto delle temperature comporterà un raddoppio del numero di notti tropicali nel 2050, raggiungendo un valore triplicato a fine secolo, passando da una media di 46 notti/anno del 1918-2014 a 116 notti/anno nel 2071-2100. È necessario ricordare che si tratta di valori medi del periodo: il numero di notti reali, oltreché influenzato dalle incertezze previsionali dovute ai modelli, è caratterizzato dalla normale variabilità annuale.

Allo stesso modo il numero di giorni in cui si supererà la temperatura massima di 25 °C, 30 °C e 35 °C è segnato da aumenti marcati, specialmente per quanto riguarda le temperature maggiori.

La lettura dell'indicatore sulle ondate di calore, che misura il numero di volte in cui si presentano almeno 6 giorni consecutivi con temperature massime superiori al 90° percentile, ovvero temperature "insolite" per il periodo, presenta un aumento di due ordini di grandezza: il significato reale è che il caldo estremo non diverrà più un'anomalia, ma la condizione di base.

Questa interpretazione è confermata in particolare dall'indice SPEI che misura il bilancio idrico in trenta giorni, confrontando la pioggia ricevuta con la quantità di acqua persa per evaporazione e traspirazione. L'analisi delle precipitazioni cumulate non presenta variazioni significative, tranne per il periodo estivo dove si evidenzia un trend in diminuzione. Questo elemento, in sinergia con l'aumento delle temperature, porta ad un valore SPEI fortemente negativo dal 2050 in poi, segno di una tendenza a situazioni di grave siccità, indicando che la richiesta di approvvigionamento idrico per evaporazione (insieme al consumo di acqua della vegetazione) supera di gran lunga l'apporto delle precipitazioni rispetto alla media storica.

Nonostante l'aridità estiva, diversi studi indicano che il nuovo clima si manifesterà con fenomeni di precipitazione più intensi e brevi.

In estrema sintesi, l'analisi delle proiezioni di temperatura e precipitazioni mostra che il clima che attende Milano non sarà semplicemente una versione più calda di quello attuale, ma un clima profondamente diverso.

Nel 2100, la città di Milano abbandonerà il suo attuale clima temperato padano per avvicinarsi a una nuova realtà dominata da condizioni tipiche della fascia climatica mediterranea meridionale.

Questo significa che si sperimenteranno estati notevolmente più lunghe e roventi, caratterizzate da un drastico aumento delle ondate di calore, con temperature che toccheranno e supereranno i 40°C per periodi prolungati. Il clima evolverà verso le condizioni attuali di aree che oggi si trovano centinaia di chilometri più a sud, risultando in una stagione calda molto più secca e in un netto deficit idrico rispetto al passato, con presenza di fenomeni di eventi di pioggia intensi.

16 BIBLIOGRAFIA

- i. **Balistrocchi M., Grossi G., 2020.** Predicting the impact of climate change on urban drainage systems in northwestern Italy by a copula-based approach.
<https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2020.100670>
- ii. **Battaglioli F, Groenemeijer P, Púčik T, Taszarek M, Ulbrich U e Rust H, 2023.** Modeled Multidecadal Trends of Lightning and (Very) Large Hail in Europe and North America (1950–2021). *Journal of Applied Meteorology and Climatology*.
<https://doi.org/10.1175/JAMC-D-22-0195.1>
- iii. **Brunetti M., Lentini G., Maugeri M., et al., 2025.** A new dataset of Italian precipitation records for the period 1921–1950 from the Cli-DaRe@School citizen science project. *Bulletin of Atmospheric Science and Technology*. <https://doi.org/10.1007/s42865-025-00111-3>
- iv. **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. *International Journal of Climatology*, 26: 345–381. <https://doi.org/10.1002/joc.1251>
- v. **Caporali E., et al., 2021.** A review of studies on observed precipitation trends in Italy. *International Journal of Climatology*, 41: 1853–1877. <https://doi.org/10.1002/joc.6741>
- vi. **Castellari S., et al., 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>)
- vii. **Cavalleri F., Lussana C., Viterbo F., Brunetti M., Bonanno R., Manara V., Lacavalla M., Maugeri M, 2025** (preprint) Event-based analysis of extreme precipitation trends in Italy using hourly convection-permitting reanalyses. <https://doi.org/10.5194/egusphere-2025-3455>
- viii. **Coppola E., Pons F.M.E., Alberti T., Portal A., Faranda D., 2024.** October 2024 Italy multiple floods mostly strengthened by human-driven climate change. *ClimaMeter*, Institut Pierre Simon Laplace, CNRS. <https://doi.org/10.5281/zenodo.14054627>
- ix. **Fedele, G., Reder, A. & Mercogliano, P.** Statistical Downscaling over Italy using EQM: CMIP6 Climate Projections for the 1985–2100 Period. *Sci Data* 12, 910 (2025).
<https://doi.org/10.1038/s41597-025-05270-8>
- x. **Fioravanti G., et al., 2024.** Recent tendencies of extreme heat events in Italy. *Theoretical and Applied Climatology*. <https://doi.org/10.1007/s00704-024-05063-w>
- xi. **Fioravanti G., Piervitali E., Desiato F., 2016.** Recent changes of temperature extremes over Italy: an index-based analysis. *Theoretical and Applied Climatology*, 123: 473–486.
<https://doi.org/10.1007/s00704-014-1362-1>
- xii. **INAIL e CNR, 2019.** *Linee guida per la prevenzione del rischio da stress termico negli ambienti di lavoro outdoor e indoor: Il progetto Workclimate*. INAIL Edizioni.
<https://www.inail.it/cs/internet/docs/alg-linee-guida-prevenzione-stress-termico-workclimate.pdf>
- xiii. **International Organization for Standardization (ISO), 2017.** *ISO 7243:2017. Ergonomics of the thermal environment — Assessment of heat stress using the WBGT (wet bulb globe temperature) index*.
- xiv. **IPCC, 2023:** Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2023: Synthesis Report*. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, pp. 1-34. <https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.001>
- xv. **Masterton J.M., Richardson F.A., 1979.** *Humidex: A method of quantifying human discomfort due to excessive heat and humidity*. Environment Canada, Toronto.

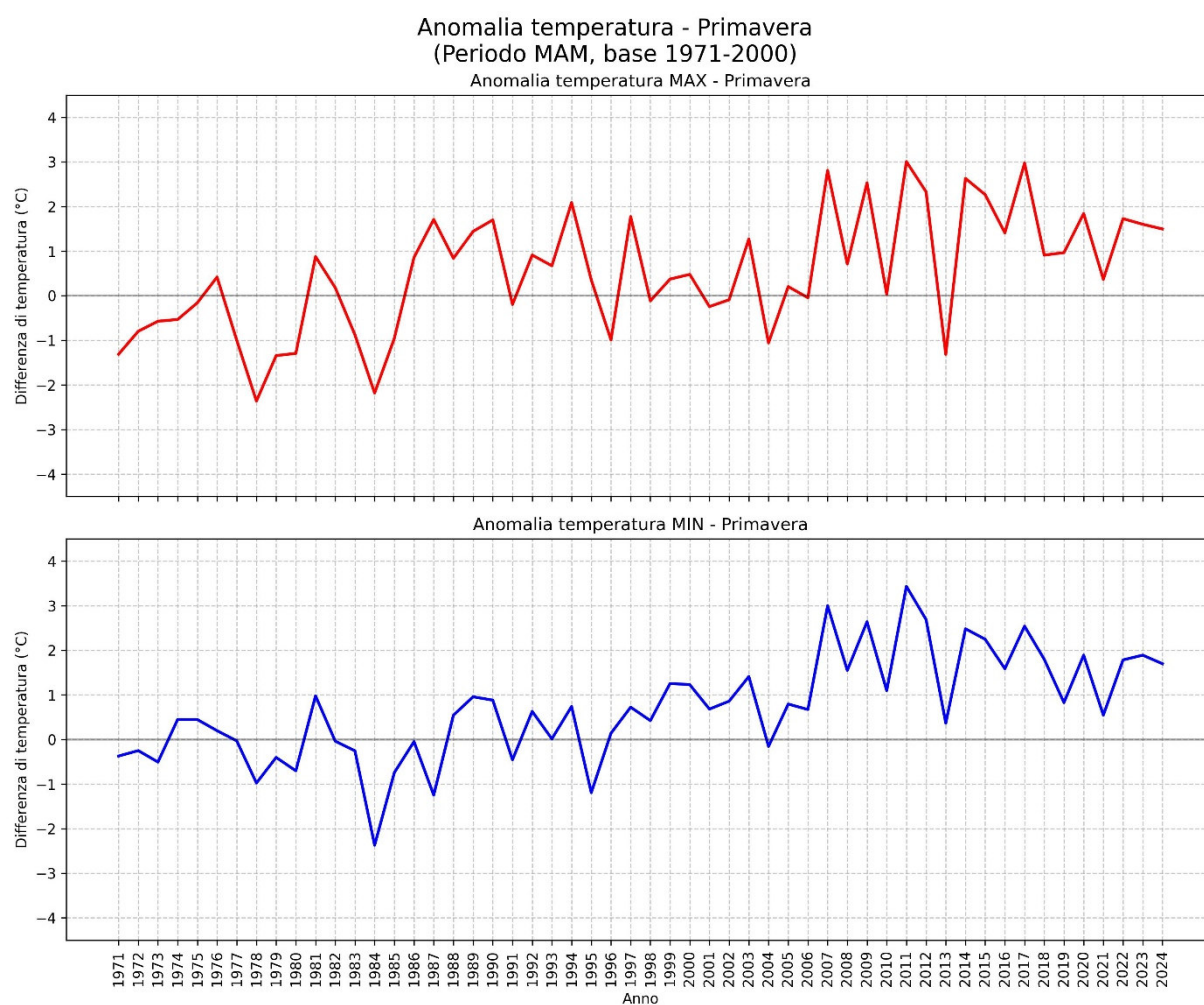
- xvi. **Maugeri M., Buffoni L., and Chlistovsky F., 2002.** Daily Milan Temperature and Pressure Series (1763–1998): History of the Observations and Data and Metadata Recovery. *Climatic Change*, 53: 101–117. <https://doi.org/10.1023/A:1014970825579>
- xvii. **Maugeri M., Buffoni L., Del Monte B., Fassina A., 2002.** Daily Milan temperature and pressure time series (1763–1998): Completing and homogenising the data. *Climatic Change*, 53: 119–149. <https://doi.org/10.1023/A:1014923027396>
- xviii. **Ministero della Salute (Direzione Generale della Prevenzione Sanitaria) e Dipartimento di Epidemiologia del Lazio (DEP), 2024.** *Piano Operativo Nazionale per la Prevenzione degli Effetti del Caldo sulla Salute – Anno 2024*. <https://www.salute.gov.it/portale/caldo/homeCaldo.jsp>
- xix. **Pavan V, Antolini G, Barbiero R, et al., 2018.** High resolution climate precipitation analysis for north-central Italy, 1961–2015. *Climate Dynamics*, 52: 3435–3453. <https://doi.org/10.1007/s00382-018-4337-6>
- xx. **Rädler, A.T., Groenemeijer, P.H., Faust, E. et al.** Frequency of severe thunderstorms across Europe expected to increase in the 21st century due to rising instability. *npj Clim Atmos Sci* 2, 30 (2019). <https://doi.org/10.1038/s41612-019-0083-7>
- xxi. **SRAC Lombardia - Strategia Regionale di Adattamento ai Cambiamenti Climatici per la regione Lombardia:** http://www.regione.lombardia.it/wps/wcm/connect/841f23be-02ea-423cb868-52cc92b6578/Allegato+alla+Comunicazione_Rapporto+di+sintesi_DEF.pdf
- xxii. **Stull R., 2011.** *Wet-Bulb Temperature from Relative Humidity and Air Temperature*. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, Vol. 50, No. 11, pp. 2267–2269. <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-11-0143.1>
- xxiii. **Sui X., Yang Z., Shepherd M., & Niyogi, D., 2024,** Global scale assessment of urban precipitation anomalies. <https://doi.org/10.1073/pnas.2311496121>
- xxiv. **Todeschini S., 2012,** Trends in long daily rainfall series of Lombardia (northern Italy) affecting urban stormwater control. <https://doi.org/10.1002/joc.2313>
- xxv. **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. <https://doi.org/10.1007/s007040070008>
- xxvi. **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. <https://doi.org/10.1007/s10584-009-9640-0>

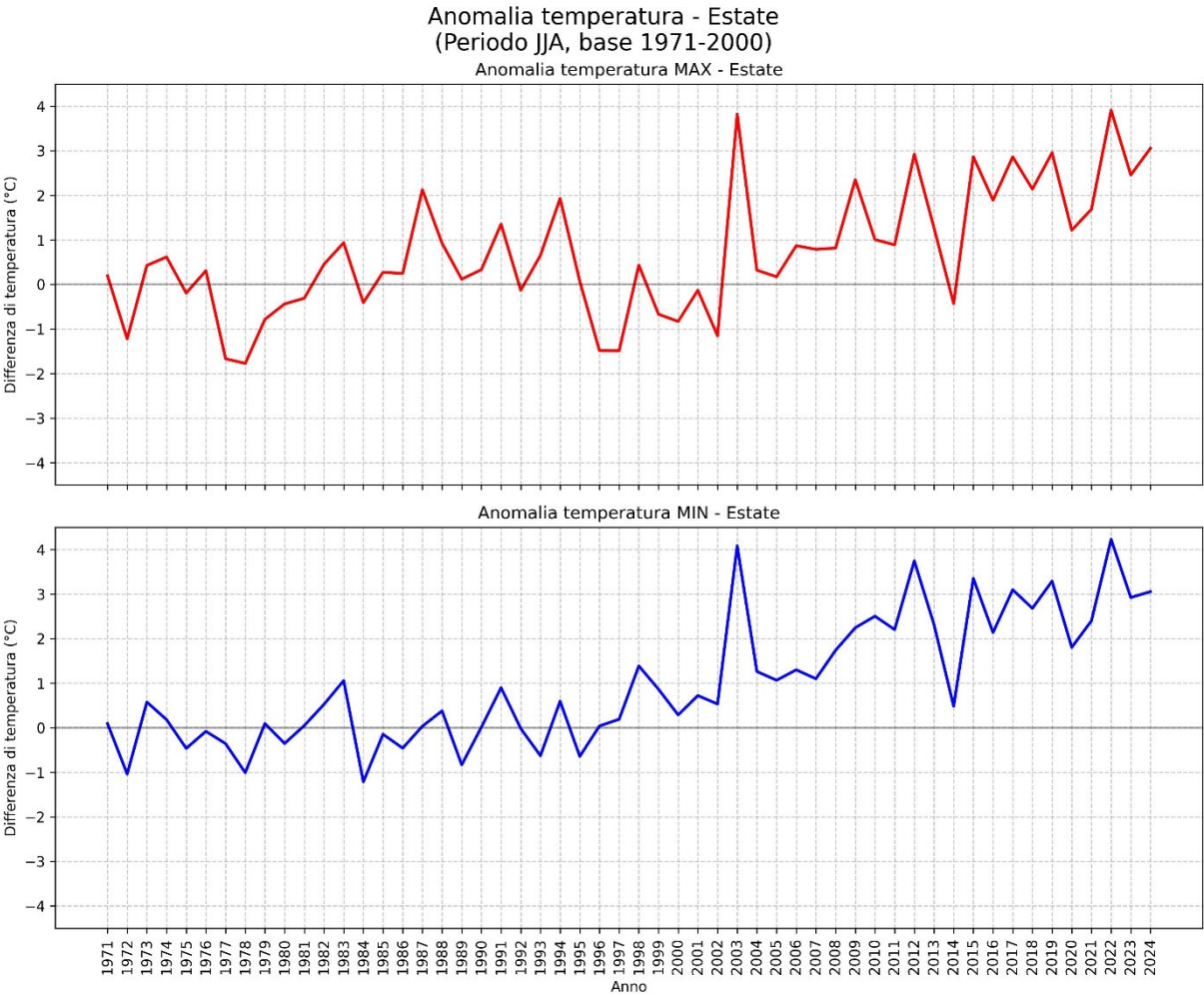
17 APPENDICE 1 – altri grafici

In appendice sono riportati ulteriori grafici che sono stati prodotti nell'ambito del presente studio e che per facilità di lettura non sono stati inclusi nel testo, ma possono essere utili per ulteriori approfondimenti o per applicazioni specifiche.

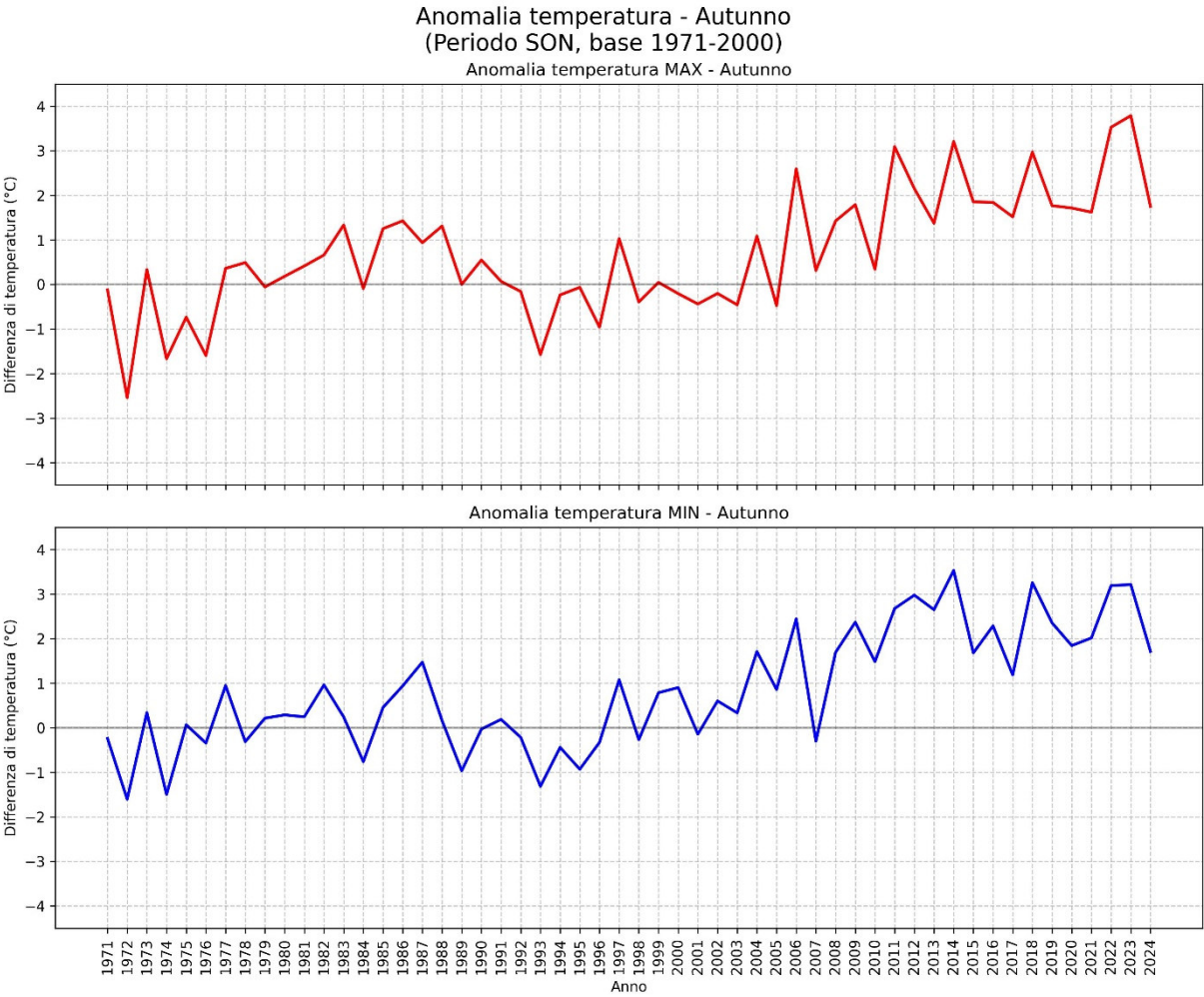
Andamento anomalie di temperatura per stagione

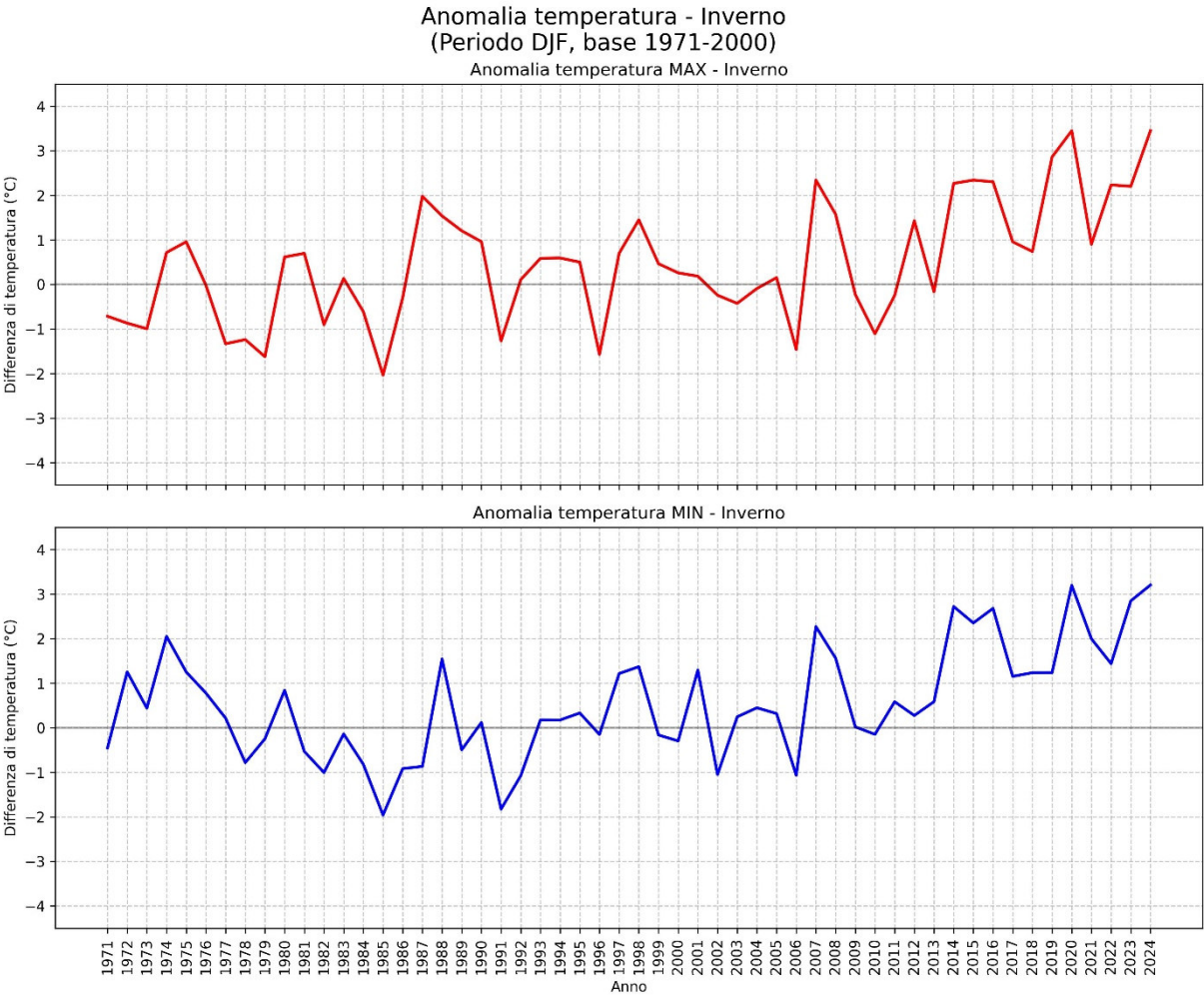
Andamento delle anomalie di temperature per stagione meteorologica, riferite al periodo 1971-2000 – stazione Milano Brera





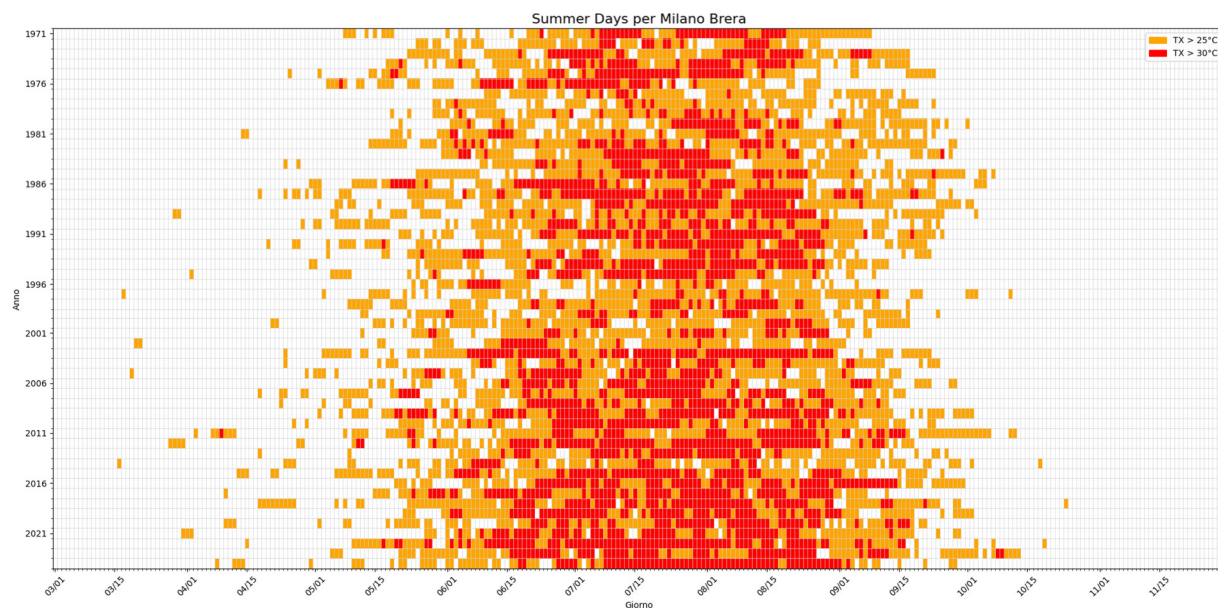
PROFILO CLIMATICO LOCALE PER LA CITTA' DI MILANO





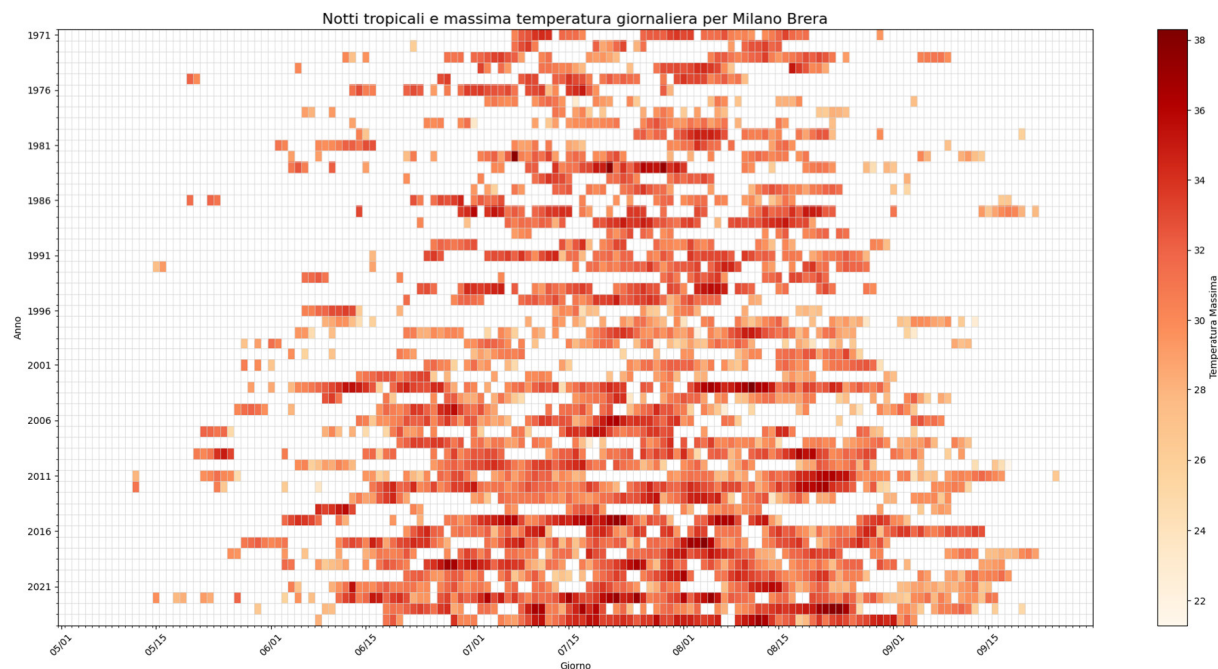
Distribuzione dei giorni estivi

Andamento nel tempo dei giorni estivi ($< 25^{\circ}\text{C}$) e giorni molto caldi ($> 30^{\circ}\text{C}$) – periodo marzo/novembre



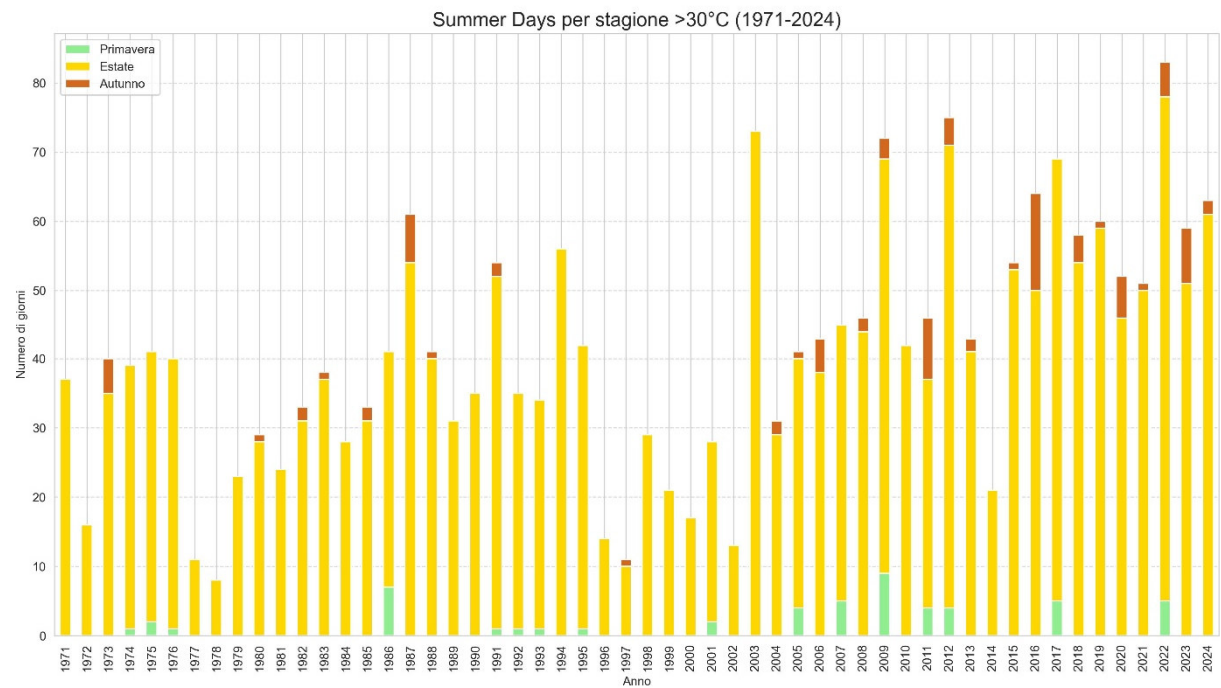
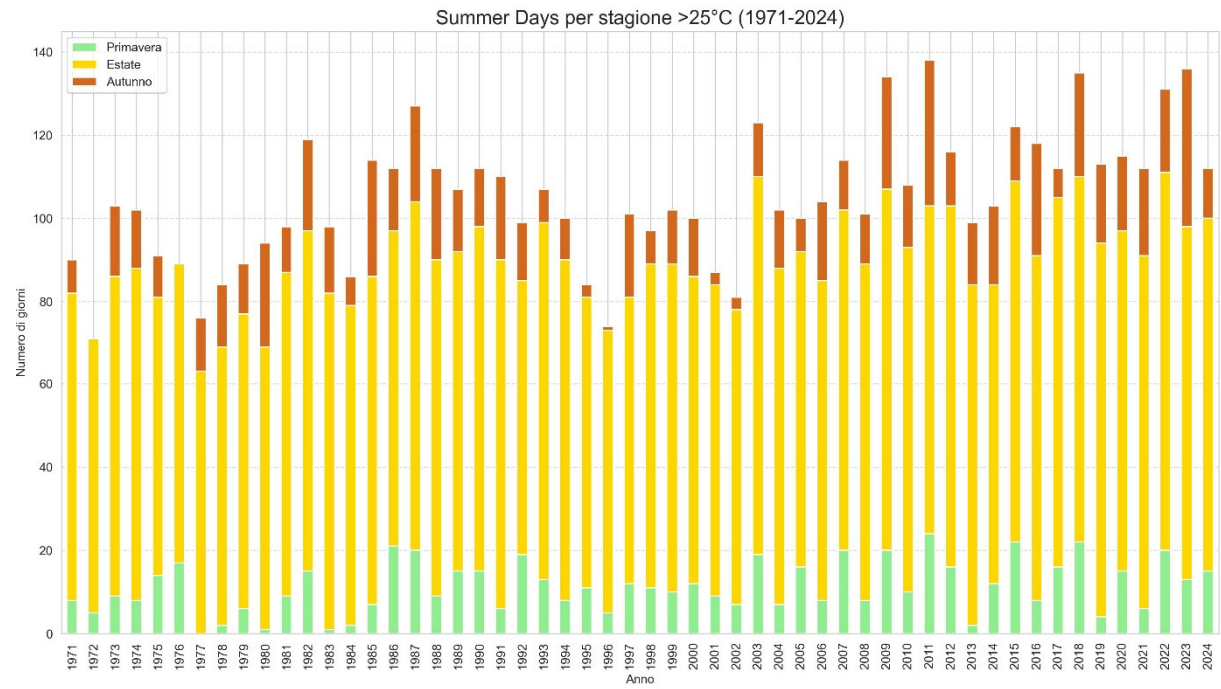
Distribuzione delle notti tropicali

Andamento nel tempo delle notti tropicali e del valore massimo di temperatura registrato durante il giorno



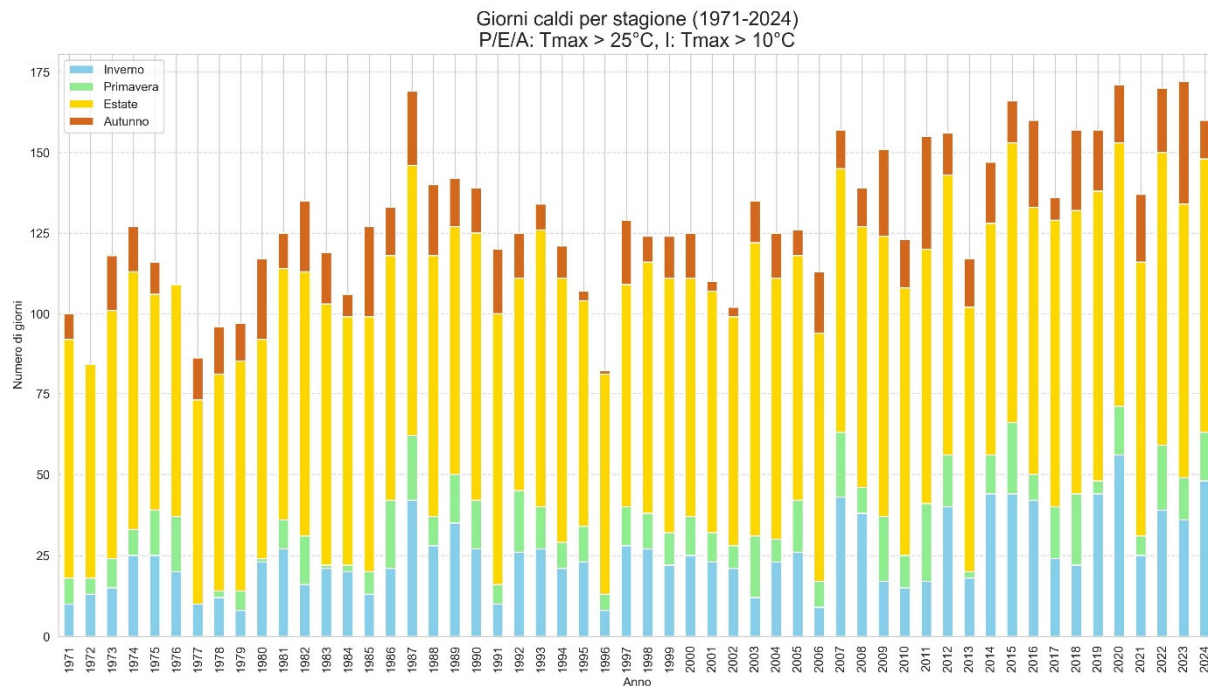
Distribuzione dei giorni estivi per stagione

Giorni estivi con soglia 25 °C e 30 °C per stagione meteorologica – stazione Milano Brera



Andamento “giorni caldi” per stagione

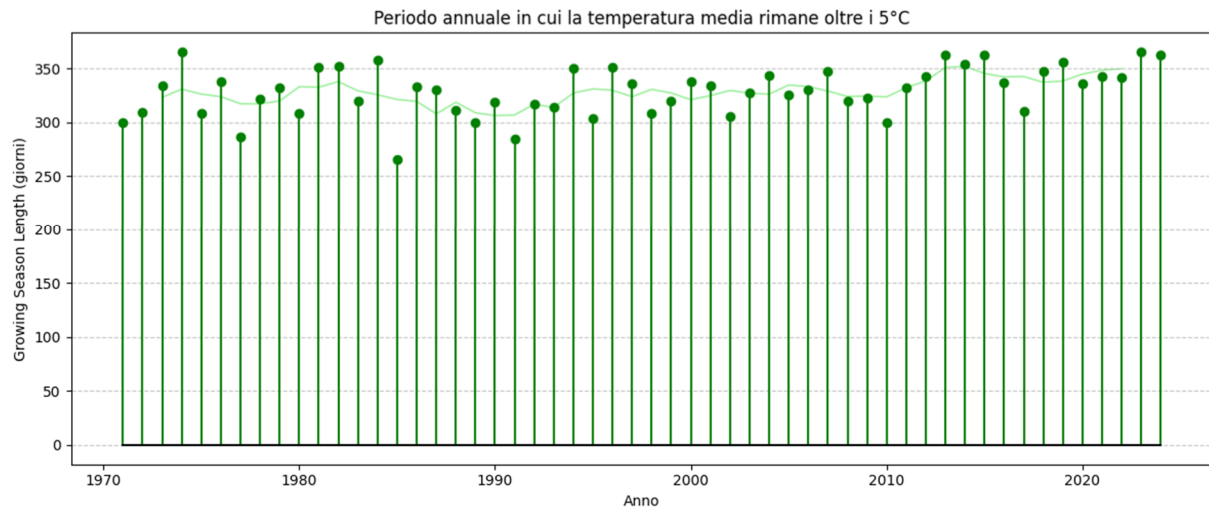
Giorni caldi con soglia su temperatura massima superiore a 25 °C per primavera, estate e autunno e 10 °C per inverno – stazione Milano Brera



Durata della stagione vegetativa

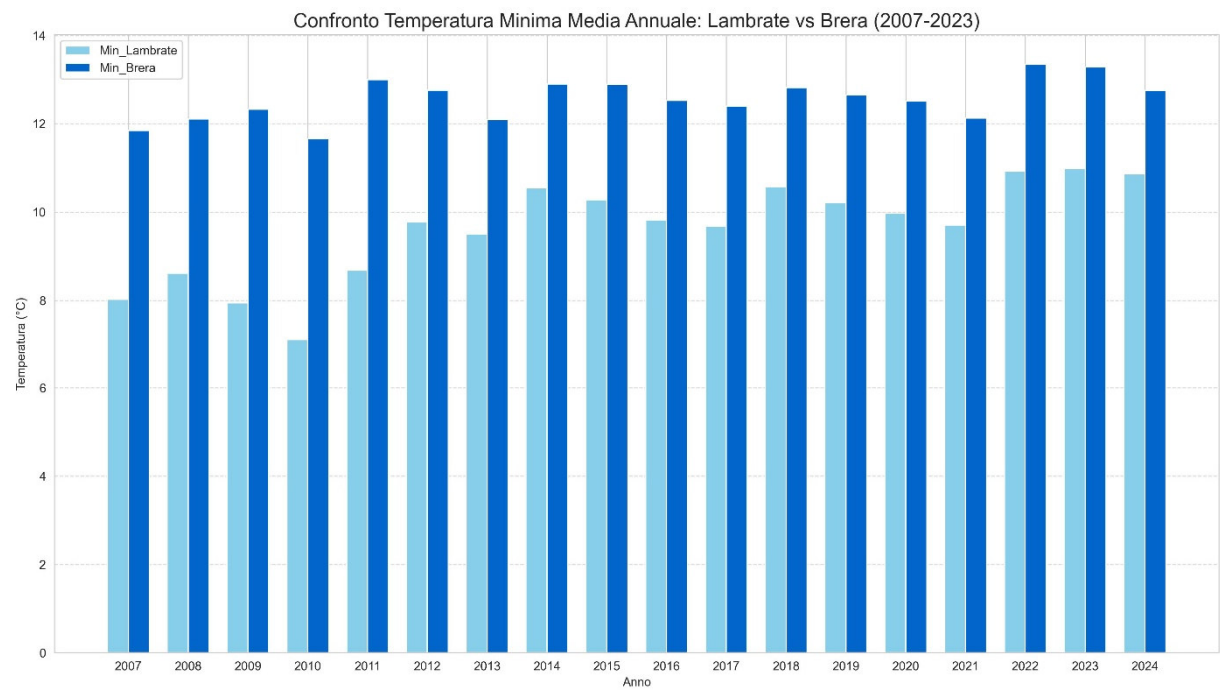
La durata della stagione vegetativa (GSL – Growing Season length) è un esempio di indicatore legato al settore dell'agricoltura che contabilizza il periodo annuale in cui la temperatura media rimane oltre i 5 °C

Durata della stagione vegetativa



Confronto temperature minime annuali

Di seguito si riporta un confronto tra le temperature minime media annuale tra le stazioni di Brera e Lambrate. Il dato conferma l'effetto isola di calore, quantificabile in circa 5 °C con un trend in diminuzione negli ultimi anni.

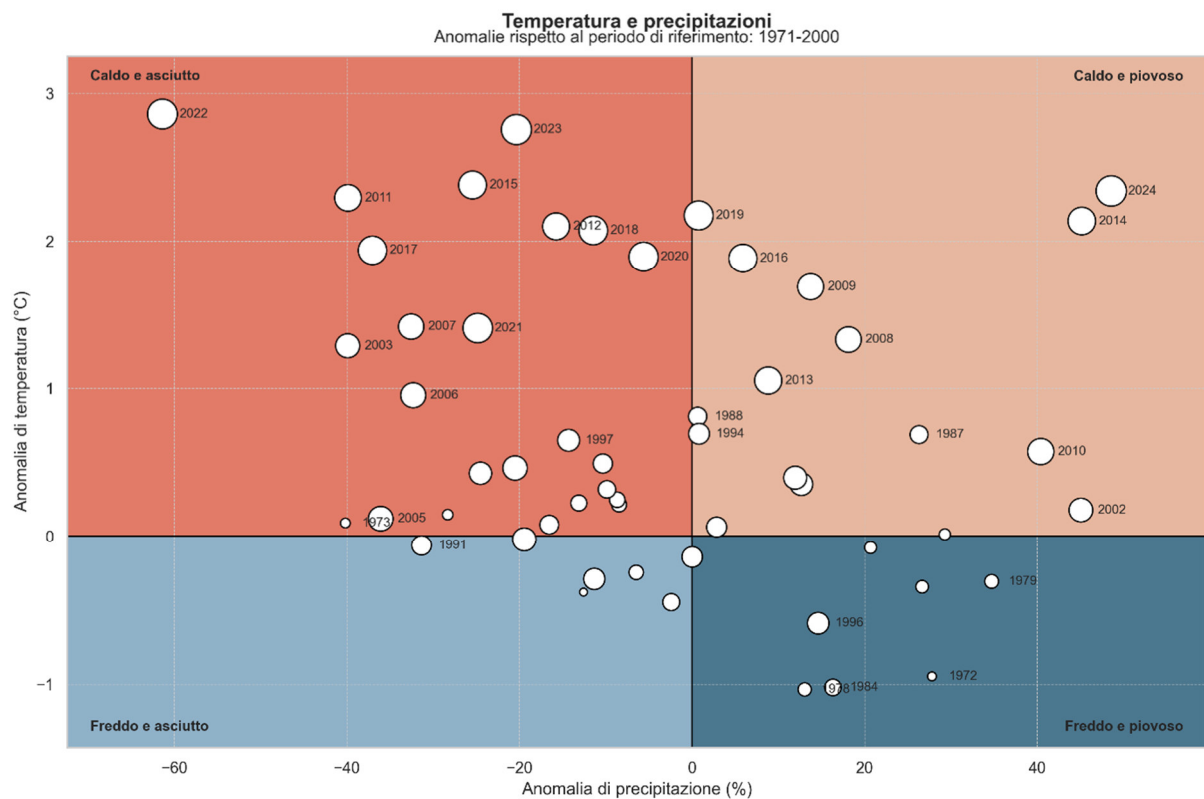


Anomalie termiche e pluviometriche

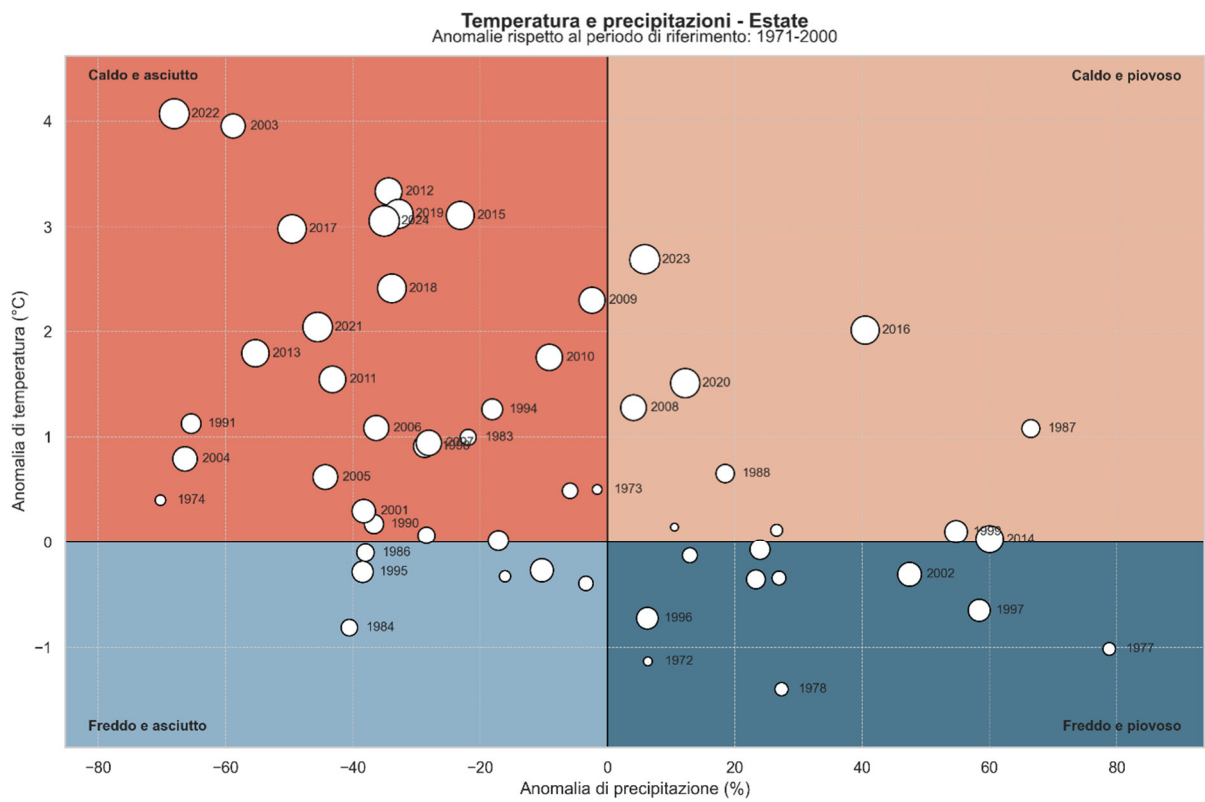
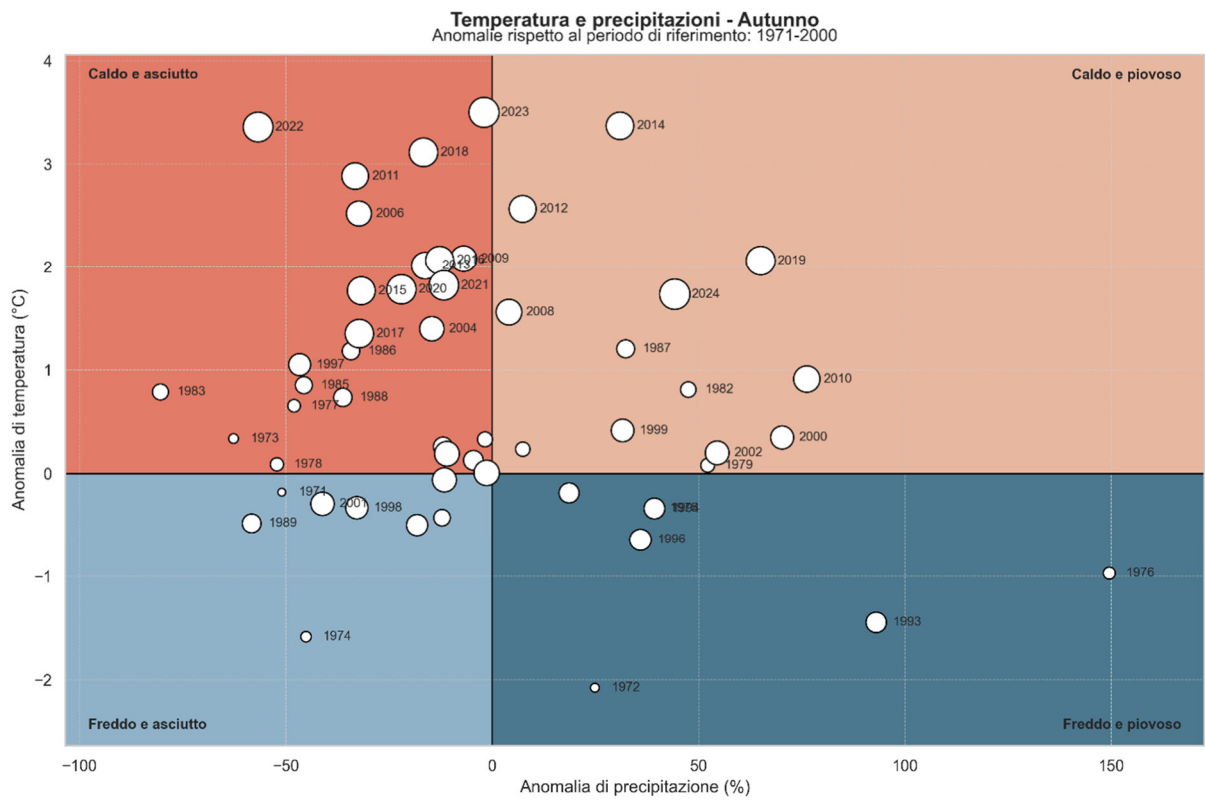
Di seguito si riporta un'analisi riferita alle anomalie termiche e rispetto alla precipitazione cumulata.

Ogni anno viene rappresentato da un cerchio, la grandezza maggiore rappresenta gli anni più recenti. Nell'asse delle X vengono riportati i valori di anomalia pluviometrica, mentre in quello delle Y quelle di anomalia termica rispetto al periodo di riferimento 1971-2000.

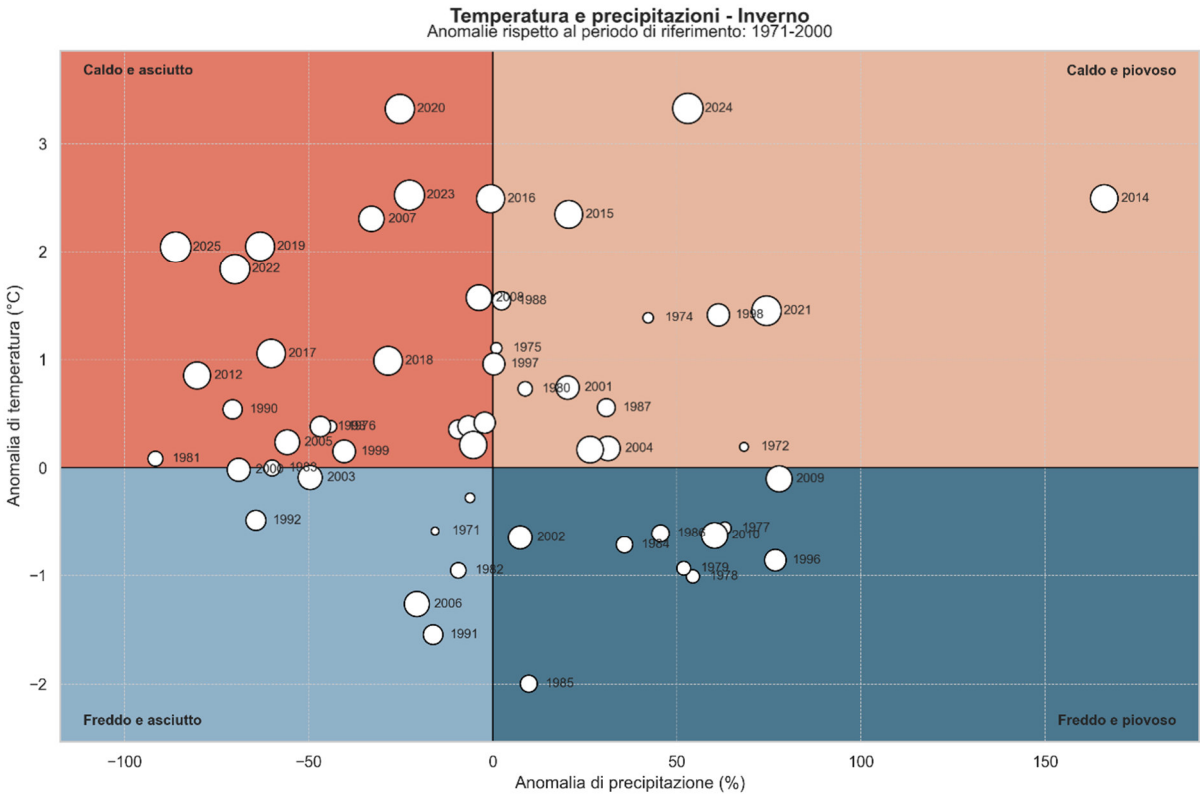
Sono presentati i grafici riferiti ai diversi anni e alle diverse stagioni. Appare evidente una generale tendenza degli anni recenti verso il quadrante "caldo e asciutto".



PROFILO CLIMATICO LOCALE PER LA CITTA' DI MILANO



PROFILO CLIMATICO LOCALE PER LA CITTA' DI MILANO



18 APPENDICE 2 - raccordo con precedente Profilo Climatico Locale

La presente appendice ha lo scopo di “raccordare” e spiegare le differenti conclusioni tra il precedente Profilo Climatico Locale e la versione attuale aggiornata.

Nel precedente studio, per quanto concerne le proiezioni future, gli scenari di cambiamento climatico durante il periodo 2021-2050 sono stati costruiti attraverso il modello CCAReg, applicato ai campi in quota dei modelli globali CMCC-CM, MPI, CNRM, con riferimento allo scenario **RCP 4.5**.

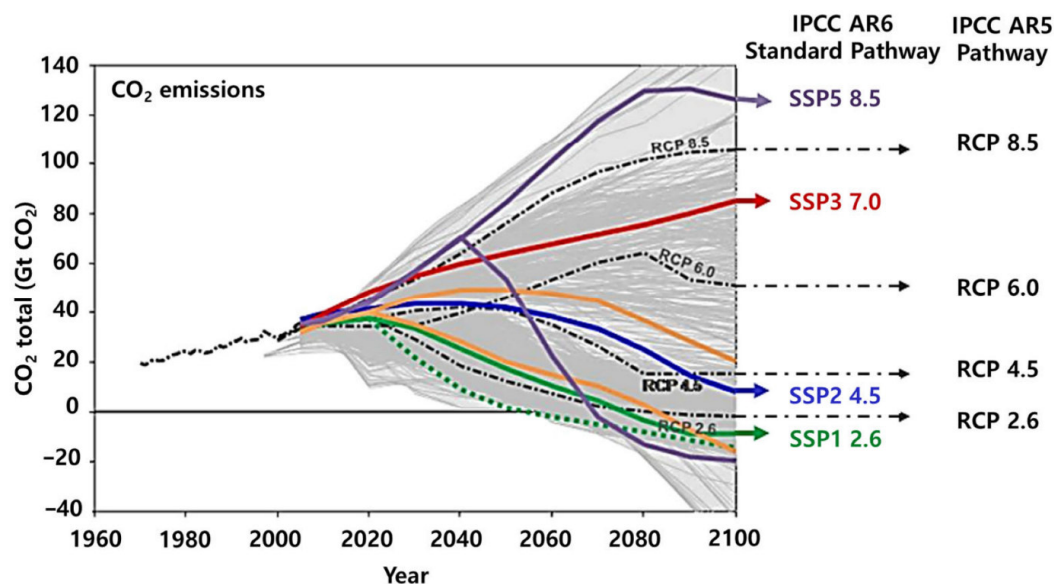
Il documento individuava le variazioni delle temperature minime e massime nelle differenti stagioni, rispetto al **periodo di riferimento 1971-2000**:

- Temperatura minima stagionale (Ensemble Mean): tra 1.3 e 2.2 °C
- Temperatura massima stagionale (Ensemble Mean): tra 1 e 2.3 °C

Il range complessivo è quindi 1–2.3°C per Tmin e Tmax stagionali.

Il presente documento, come accennato nelle premesse, ha adottato nuovi modelli e scenari, allungando le proiezioni fino al 2100.

Nel presente documento viene invece utilizzato un ensemble di 7 modelli (CNRM-ESM2-1, EC-Earth3-Veg, IPSL-CM6A-LR, MIROC6, MPI-ESM1-2-HR, NorESM2-MM, UKESM1-0-LL) e viene indagato lo scenario SSP3-7.0, uno scenario di riferimento ad alte emissioni coerente con le traiettorie attualmente osservate a livello globale.



(fonte: <https://niwa.co.nz/images/co2-emissions-ssp.png>)

Il periodo di riferimento utilizzato dai modelli, inoltre, è il 1985-2014.

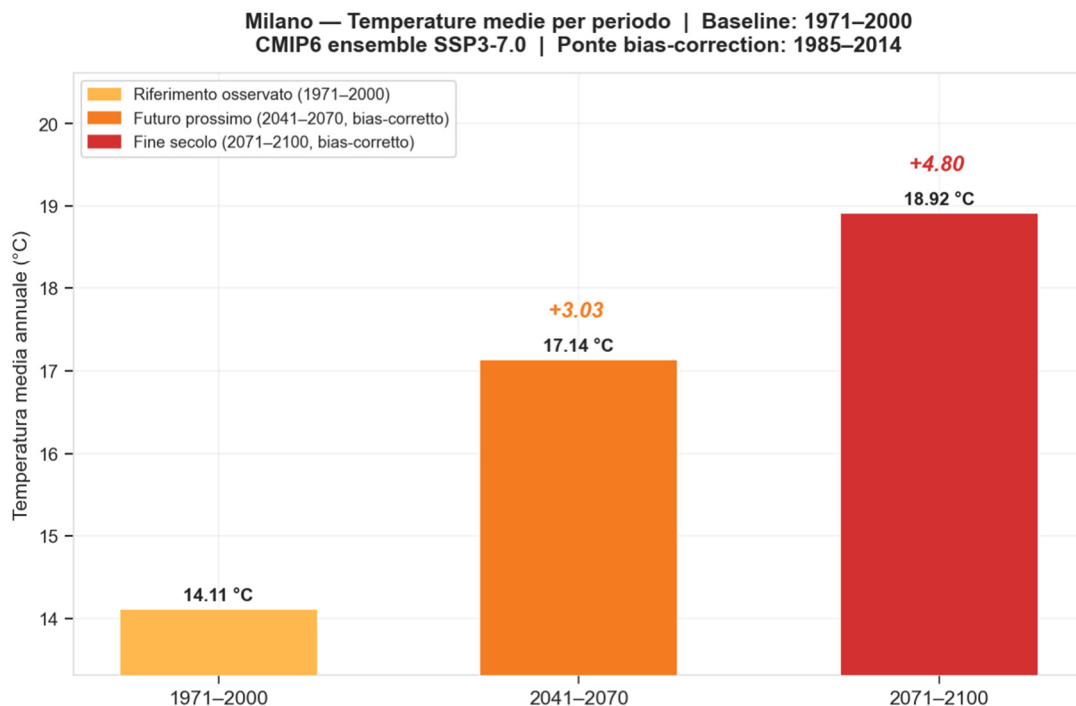
Non è pertanto possibile un diretto paragone tra i risultati delle proiezioni descritti nel precedente Profilo Climatico Locale, avendo variato sia il periodo di riferimento (dal 1971-2000 al 1985-2014) e lo scenario (da RCP 4.5 a SSP 3 7.0).

Si annota, per completezza, che comunque gli scenari RCP dell'AR5 e gli SSP dell'AR6 non sono direttamente confrontabili: condividono solo il valore del cosiddetto forcing radiativo al

2100 (ad esempio 4.5 W/m^2), ma differiscono nel mix di emissioni che porta a quel risultato (a titolo di esempio, SSP2-4.5 è caratterizzato da più CO_2 e metano rispetto a RCP4.5, compensati da una riduzione più rapida degli aerosol). A questo si aggiunge il fatto che i due set di scenari sono stati simulati con generazioni diverse di modelli climatici (CMIP5 per gli RCP, CMIP6 per gli SSP), e i modelli CMIP6 mostrano in media una sensibilità climatica più elevata: il risultato è che, anche a parità di "etichetta" numerica, le proiezioni che ne derivano sono quantitativamente diverse e non intercambiabili.

Non è pertanto possibile un diretto paragone tra i risultati delle proiezioni descritti nel precedente Profilo Climatico Locale, avendo variato sia il periodo di riferimento (dal 1971–2000 al 1985–2014) sia lo scenario (da RCP 4.5 a SSP3-7.0).

Per proporre comunque un raccordo quantitativo tra i due studi è stata adottata la cosiddetta metodologia 'ponte': il periodo 1985–2014 — unico intervallo per cui sono disponibili sia osservazioni reali sia simulazioni del clima storico CMIP6 — viene utilizzato come aggancio tra i due sistemi modellistici. La differenza di temperatura osservata tra il vecchio periodo di riferimento (1971–2000) e il nuovo (1985–2014) viene sommata alle proiezioni future CMIP6, in modo da ricondurre tutte le stime allo stesso riferimento iniziale. Il risultato è illustrato nel grafico seguente.



Metodo del ponte: anomalia CMIP6 su 1985–2014 riproiettata su spazio osservato | bias modello: $-0.45 \text{ }^{\circ}\text{C}$ | $T_{media} = (T_{max} + T_{min})/2$ | CMIP6 ensemble SSP3-7.0

Come si evince dal grafico, rispetto al periodo di riferimento 1971–2000, l'incremento della temperatura media annuale atteso al 2050 è di circa $3 \text{ }^{\circ}\text{C}$, a fronte dei circa $2 \text{ }^{\circ}\text{C}$ stimati nel precedente studio. Questa differenza non segnala un errore del lavoro precedente, ma riflette l'evoluzione degli strumenti scientifici disponibili: uno scenario di emissione aggiornato e più coerente con le traiettorie osservate negli ultimi anni, una nuova generazione di modelli climatici (CMIP6) con sensibilità climatica media più elevata, applicati al territorio italiano attraverso il dataset statisticamente downscalato del CMCC — con conseguente maggiore dettaglio spaziale — e un orizzonte temporale esteso fino al 2100. Il presente aggiornamento del Profilo Climatico Locale, pur restando in continuità con il precedente, fornisce quindi una stima più aggiornata e cautelativa del riscaldamento atteso, maggiormente adeguata a orientare le scelte di adattamento a scala locale.