

ALMA MATER STUDIORUM - UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

SCUOLA DI INGEGNERIA E ARCHITETTURA

DIPARTIMENTO DI ARCHITETTURA

CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN INGEGNERIA EDILE-ARCHITETTURA

TESI DI LAUREA

in
Science of Climate Change

**ANALISI DEI TREND CLIMATICI DI CAPOLUOGHI ITALIANI
PER LO SVILUPPO DI STRATEGIE DI ADATTAMENTO AL
RISCALDAMENTO CLIMATICO IN AMBITO URBANO**

CANDIDATO:
Marta Benetti

RELATORE:
Chiar.mo Prof. Alberto Montanari

Anno Accademico 2025/26
Sessione I

Abstract

Il cambiamento climatico rappresenta una delle principali sfide per la progettazione e la gestione delle città contemporanee, rendendo sempre più necessario integrare la conoscenza delle dinamiche climatiche nei processi di pianificazione e progettazione. Il presente elaborato analizza l'evoluzione del clima di cinque capoluoghi italiani – Roma, Milano, Napoli, Torino e Palermo – con l'obiettivo di fornire ad architetti e ingegneri informazioni di supporto per la comprensione dei fenomeni climatici e per lo sviluppo di strategie di adattamento in ambito urbano.

A tal fine è stato sviluppato un programma in linguaggio R, utilizzando l'ambiente RStudio, per l'analisi delle serie climatiche giornaliere, mensili e annuali, rendendo il processo riproducibile e applicabile a differenti dataset. Lo studio si concentra sui parametri di temperatura (massima, minima e media) e analizza i trend lineari, i trend polinomiali di secondo grado e l'autocorrelazione delle serie storiche.

I risultati evidenziano un chiaro processo di riscaldamento in tutti i capoluoghi analizzati, con un incremento delle temperature massime, minime e medie a tutte le scale temporali considerate. Le serie ultracentenarie di Milano e Torino consentono inoltre di confrontare il riscaldamento recente con l'evoluzione climatica precedente alla rivoluzione industriale e di osservare le principali oscillazioni climatiche storiche. L'analisi mette in luce anche differenze nelle modalità con cui il riscaldamento si manifesta nei diversi contesti urbani e sottolinea l'importanza della qualità, della continuità e della lunghezza delle serie climatiche nell'interpretazione dei risultati.

L'elaborato si conclude con una revisione delle principali strategie di adattamento al riscaldamento climatico in ambito urbano, evidenziando il ruolo della progettazione integrata nel migliorare la resilienza delle città e nel ridurre la vulnerabilità agli effetti del cambiamento climatico.

Indice

Introduzione	1
Capitolo 1: Il riscaldamento climatico	3
Capitolo 2: L'algoritmo per le analisi di tendenze climatiche	14
Perché sviluppare un codice di calcolo	14
La preparazione dei dati	16
Il calcolo della temperatura media	17
Il calcolo del trend lineare	17
Il calcolo del trend polinomiale	20
Le aggregazioni temporali mensili e annuali	21
L'autocorrelazione delle serie temporali	22
L'esportazione automatica dei risultati	24
La parametrizzazione degli aspetti grafici	25
Capitolo 3: I criteri di scelta dei capoluoghi da analizzare e delle relative stazioni	26
Capitolo 4: I risultati dell'analisi	34
Roma – Roma Macao	35
Milano – Milano Brera	54

Napoli – Napoli Capodichino	68
Torino – Torino Giardini Reali	90
Palermo -Palermo Osservatorio Astronomico	104
Analisi e confronto dei risultati ottenuti	126
Capitolo 5: Strategie di adattamento al riscaldamento climatico in ambito urbano	130
Gli interventi green	132
Gli interventi blue	134
Gli interventi grey	135
Gli interventi soft	136
Conclusione	140
Bibliografia	144

Introduzione

Osservando le statistiche relative alle emissioni di CO₂ emerge un dato interessante: a livello globale, il settore edile produce più di 2,6 miliardi di tonnellate di CO₂ all'anno¹, classificandosi come il quarto settore più impattante sul clima.

Da questa consapevolezza nasce la volontà di sviluppare un progetto di analisi climatica dei capoluoghi italiani, con l'obiettivo di fornire nuovi strumenti ai professionisti del mondo edile per partecipare con maggiore sensibilità, efficacia ed oggettività alle sfide indotte dalla crisi climatica.

Lo sviluppo di elementari competenze di ricerca, ad esempio, può contribuire a rendere i progettisti delle figure tecniche più autonome, in grado di formulare una propria comprensione dei fenomeni, che li possa predisporre a un dialogo più costruttivo con altre figure professionali e con ricercatori e studiosi del *climate change*. Questa indipendenza intellettuale e questa spinta alla cooperazione aiutano la figura del tecnico ad affrontare le sfide climatiche con maggiore consapevolezza e libertà di coscienza, rafforzando e abbracciando anche il ruolo di “coordinamento” che viene tipicamente associato all'Architetto-Ingegnere.

Architetti e ingegneri hanno un coinvolgimento importante sia nell'adattamento alle conseguenze del cambiamento climatico che nella mitigazione delle sue cause. Una corretta progettazione degli spazi urbani e del costruito può ridurre, infatti, gli effetti del riscaldamento urbano sulla salute della popolazione, contenendo i picchi di temperatura e fornendo ripari adeguati al caldo estremo. Contemporaneamente città verdi, *passive houses* e altre soluzioni innovative possono contribuire sia in maniera diretta che indiretta alla riduzione della CO₂ atmosferica e alla neutralizzazione di altre forme di inquinamento che affliggono le aree urbane.

Per sviluppare valide soluzioni di adattamento e mitigazione è, come già accennato, fondamentale partire dalla ricerca e dalla comprensione di come stia cambiando il clima

¹ **Our World in Data**, “CO₂ Emissions by Sector”, grafico interattivo, consultato l'11 luglio 2026. <https://ourworldindata.org/grapher/co-emissions-by-sector?tab=discrete-bar&time=latest>.

nelle nostre città e quali vantaggi e svantaggi offrano le principali strategie adattative disponibili. Questo elaborato si pone come obiettivo un percorso che va dall'analisi alla valutazione di tali soluzioni, mantenendo uno sguardo incentrato sugli estremi di temperatura e sulle temperature massime. Quest'ultimo parametro, in particolare, è rappresentativo dei fenomeni che gravano maggiormente sul benessere nei nostri capoluoghi.

Il seguente progetto di tesi vuole, da ultimo, riuscire a mostrare al maggior numero di persone le dinamiche ed i rischi che cambiamento climatico e riscaldamento urbano rappresentano per le nostre città.

Tra gli obiettivi vi è, pertanto, la promozione di un dialogo che coinvolga un pubblico vario, formato da professionisti di diverse discipline e da persone interessate alla tematica in questione.

Capitolo 1: Il riscaldamento climatico

Per parlare di cambiamento climatico è fondamentale partire dalla definizione di due terminologie essenziali: clima e meteorologia. Queste due grandezze esprimono, in un certo senso, fenomeni strettamente connessi, ma che differiscono per la scala temporale e geografica. Questi due termini riassumono concetti elementari, sui quali si articolano i numerosi temi di meteorologia e di cambiamento climatico e sui quali si baseranno le successive considerazioni di questo elaborato.

Il *clima* può essere definito come la distribuzione nel lungo periodo (convenzionalmente minimo 30 anni circa) delle statistiche ottenute per le condizioni meteorologiche di una specifica regione, mentre la *meteorologia* studia i fenomeni atmosferici a scala temporale ridotta.

La scala temporale propria del meteo è infatti molto più breve rispetto a quella del clima: in questo caso si parla, infatti, di numero di giorni, e non più di anni e decenni². Parliamo di meteo quando, ad esempio, ci riferiamo ad un temporale intenso o ad un'ondata di calore, ma parliamo di clima quando affrontiamo tematiche come la diminuzione delle precipitazioni medie o l'espansione delle zone climatiche tropicali.

Il cambiamento climatico, a sua volta, può essere definito come un cambiamento significativo e a lungo termine nelle statistiche dei modelli meteorologici.

Lo studio di tale cambiamento avviene attraverso la raccolta dei dati meteorologici locali, portata avanti per un intervallo di tempo di almeno 30 anni, e la successiva analisi di tali rilevazioni per ottenerne una distribuzione statistica: se si registra un cambiamento significativo nel tempo di tali statistiche, allora il cambiamento climatico si può considerare come un'evidenza scientifica¹.

I dati meteorologici studiati sono un insieme di varie grandezze, che esprimono le diverse componenti del clima. Tra queste variabili, le più comunemente analizzate sono le temperature medie, le temperature massime, le temperature minime, i parametri di

² Alberto Montanari, "The climate change problem", aggiornato il 31 marzo 2026. <https://www.albertomontanari.it/node/104>.

piovosità, gli indicatori che definiscono velocità e direzione dei venti, la quantificazione delle ore di sole e della potenza della radiazione solare, ecc.

Tali parametri vengono studiati con l'obiettivo di comprendere i processi che governano il clima, i meccanismi che lo influenzano e i trend con cui varia nel tempo, per ottenere previsioni di scenari futuri, utili a sviluppare politiche di mitigazione e adattamento.

La temperatura media è la grandezza tradizionalmente più analizzata nella letteratura relativa al cambiamento climatico, in quanto permette di studiare le tendenze climatiche eliminando il rumore introdotto dalle oscillazioni degli estremi, più imprevedibili ed irregolari. Come affermato nell'articolo "Global, Regional, and Megacity Trends in the Highest Temperature of the Year: Diagnostics and Evidence for Accelerating Trends"³, tale grandezza, ricorrendo in diversi studi, è funzionale anche alla comparazione dei risultati ottenuti da diversi ricercatori nel tempo ed in diverse località terrestri.

Se si studiano i fenomeni atmosferici in un intervallo di tempo caratteristico delle abitudini di vita quotidiana degli individui, le grandezze climatiche più interessanti da analizzare sono, tuttavia, le temperature massime e le temperature minime giornaliere.

I due estremi di temperatura, infatti, sono l'indicatore che mette in luce la frequenza di fenomeni meteorologici pericolosi come le ondate di calore e la migrazione dello zero termico ad altitudini montane superiori.

L'aumento delle minime di temperatura ha come conseguenza lo scioglimento dei ghiacciai d'alta quota, da cui deriva l'alterazione delle riserve idriche del territorio e delle aree pedemontane e pianeggianti limitrofe. Tale cambiamento nell'idrologia delle zone rifornite dalle acque di disgelo, grava non solo sui biosistemi naturali, ma anche sulle attività dell'uomo, inficiando il settore agricolo, zootecnico ed industriale delle aree subordinate agli ambienti montani, provocando danni economici ed instabilità delle risorse primarie.

Lo spostamento dello zero termico verso altitudini più elevate determina una grave perdita degli ecosistemi montani ed un aumento del rischio di valanghe, poiché, la generale mancanza di precipitazioni nevose si somma a forti ed improvvise nevicate dando origine

³ Simon Michael Papalexiou, et al. "Global, Regional, and Megacity Trends in the Highest Temperature of the Year: Diagnostics and Evidence for Accelerating Trends", *Earth's Future* 6, no. 1 (2018). <https://doi.org/10.1002/2017EF000709>.

ad un manto nevoso privo di compattezza che il sole e le alte temperature fanno sciogliere e scivolare con facilità.

L'aumento delle minime termiche, inoltre, incrementa la frequenza di frane e fenomeni di erosione accelerata, sia a causa delle forti piogge in zone dove un tempo questo non avveniva, che come conseguenza della perdita del permafrost, ovvero di quello strato di giacchio perenne che dà compattezza alle geografie montane e previene la gelivazione.

Un esempio degli effetti che l'aumento delle temperature minime può provocare è visibile sulla catena montuosa delle Alpi. La regione delle Alpi europee, infatti, registra un tasso di innalzamento delle temperature minime più elevato rispetto ai trend globali, con un aumento, analizzando il periodo 1991-2020, di 0,40 °C per decennio (che raggiunge gli 0,60 °C per decennio se si isolano le rilevazioni estive ed autunnali)⁴, a fronte di una tendenza globale che aumenta al ritmo di circa a 0,30 °C per decennio⁵.

Così come affermato da una ricerca dell'Università degli studi di Trieste pubblicata sulla rivista "Climate of the Past" dal titolo "Atmosphere–cryosphere interactions during the last phase of the Last Glacial Maximum in the European Alps"⁶, le Alpi europee risultano essere un esempio di "hotspot climatico", ovvero un'area geografica particolarmente vulnerabile ai cambiamenti climatici, dove gli effetti del riscaldamento globale sono più intensi o si manifestano più rapidamente rispetto alla media globale.

Negli ultimi anni, infatti, la catena alpina è stata protagonista della cronaca italiana proprio a causa degli eventi meteorologici estremi ed inaspettati che l'hanno interessata, non ultimo la formazione di piccole cascate di acque meteoriche sulla parete nord della cima del monte Cervino (4 478 m s.l.m.), ad un'altitudine alla quale dovrebbero presentarsi solo precipitazioni nevose.

⁴ Guido Nigrelli, "Nuovi dati sulle tendenze della temperatura nelle Alpi", CNR IRPI, Aggiornato il 30 agosto 2023. <https://www.irpi.cnr.it/nuovi-dati-sulle-tendenze-della-temperatura-nelle-alpi/>.

⁵ Ziqian Zhong, Bin He, Hans W. Chen, et al., "Reversed asymmetric warming of sub-diurnal temperature over land during recent decades" Nat. Commun. 14, 7189 (2023). <https://doi.org/10.1038/s41467-023-43007-6>.

⁶ Costanza Del Gobbo, et al., "Atmosphere–cryosphere interactions during the last phase of the Last Glacial Maximum (21 ka) in the European Alps", European Geosciences Union 19, no. 9 (2023). <https://doi.org/10.5194/cp-19-1805-2023>.

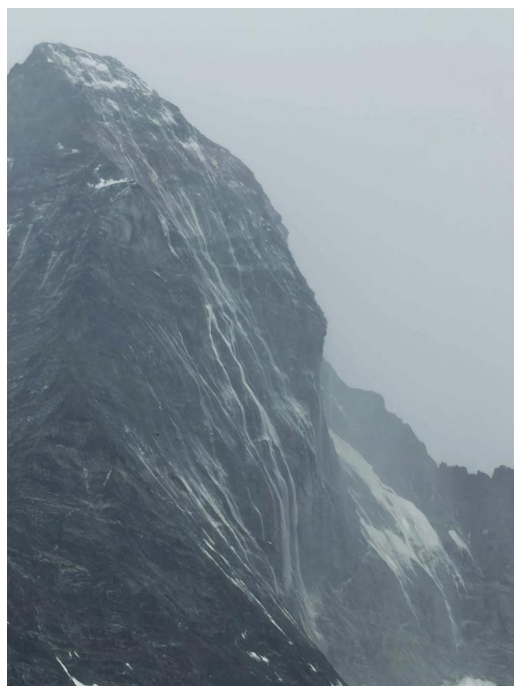


Figura 1. Foto della parete nord del monte Cervino solcata da pioggia e grandine la sera del 25 giugno 2026.
Fotografia di Lauber Harry. Fonte: www.ildolomiti.it

I fenomeni meteorologici estremi non rappresentano solo una minaccia per le persone direttamente coinvolte da alluvioni, frane, grandinate eccezionali, ecc. ma generano anche un danno economico che si riversa su tutta la società. Tra il 2020 e il 2024 i fenomeni meteorologici e climatici estremi hanno causato circa 44,9 miliardi di euro di danni all'anno in media nell'Unione Europea⁷. In tale scenario, l'Italia risulta essere il secondo Paese dell'UE per perdite economiche dovute agli eventi climatici estremi⁸.

Si stima, inoltre, che in futuro i danni economici derivanti dal cambiamento climatico potrebbero superare i 20 miliardi di euro all'anno entro il 2050 e ammontare a 34 miliardi di euro all'anno entro la fine del secolo⁹, diventando una considerevole minaccia per l'economia europea.

L'esempio delle Alpi europee, inoltre, è utile per comprendere come il cambiamento climatico non agisca in modo omogeneo, come viene riassunto e descritto dai trend delle medie globali: seppure vi sia un incremento generale della temperatura terrestre, tale

⁷ European Environment Agency, "Economic Losses from Weather- and Climate-Related Extremes in Europe", aggiornato il 13 ottobre 2025. <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/indicators/economic-losses-from-climate-related>.

⁸ Istat, Rapporto annuale 2025: La situazione del Paese, Roma, Istituto Nazionale di statistica (2025). <https://www.istat.it/wp-content/uploads/2025/05/RA-2025-volume-integrale.pdf>.

⁹ Forzieri, G., Bianchi, A., Batista e Silva, F., Herrera, M. A. M., Leblois, A., Lavalle, C., Aerts, J. C.J.H., Feyen, L. (2018): "Escalating Impacts of Climate Extremes on Critical Infrastructures in Europe", *Global Environmental Change* 48: pp. 97-107. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2017.11.007>.

aumento non avviene uniformemente, ma colpisce più severamente alcune regioni rispetto ad altre.

Tra queste regioni vi è proprio l'Europa e, più precisamente, il bacino del Mediterraneo che, insieme ad alcune località dell'Asia e ad alcune aree dell'Australia, si riscalda ad una velocità superiore rispetto ad altre regioni della Terra mostrando anche un più significativo aumento della temperatura massima annuale.

Come riportato dall'articolo di ricerca "Global, Regional, and Megacity Trends in the Highest Temperature of the Year: Diagnostics and Evidence for Accelerating Trends"¹⁰, infatti:

"Le tendenze su un arco di 50 anni mostrano che circa l'80% della superficie terrestre studiata presenta andamenti positivi dell'HTY (highest temperature of the year – massima temperatura annua), e che il 49,3% dell'area registra valori superiori a 0,20 °C per decennio (ovvero il valore della GMST - Global Mean Surface Temperature, temperatura media globale della superficie), mentre i modelli spaziali rivelano notevoli differenze tra le regioni. Due regioni principali hanno registrato tassi di variazione elevati nell'ultimo mezzo secolo: la prima, e più intensa, ha inizio nel Mar Mediterraneo, si estende in diagonale coprendo l'Europa e termina nelle regioni occidentali e nord-occidentali della Russia. La seconda regione parte dal Nepal e dal Myanmar settentrionale, si estende fino alla Cina centrale e alla Mongolia e copre la Russia orientale. Un'ampia regione situata tra queste due zone "calde" mostra lievi tendenze al ribasso, che si estendono dal Kazakistan centro-settentrionale alla Russia centrale. Ampie regioni mostrano andamenti superiori a 0,20 °C per decennio, tra cui l'Australia meridionale e gran parte della sua costa orientale, una vasta porzione del Giappone, nonché il Sudafrica e la Namibia (si noti che la copertura dei dati in Africa è limitata).

Tutte le celle disponibili in un'ampia area del territorio più settentrionale del Canada, noto come Nunavut, mostrano andamenti positivi, con alcune che indicano elevati tassi di aumento superiori a 0,60 °C per decennio. Tendenze positive modeste nell'HTY si registrano nella maggior parte degli Stati Uniti (in genere inferiori a 0,20 °C per decennio), mentre tendenze leggermente in calo si osservano in alcune zone del Midwest e del Canada meridionale. Altre regioni che mostrano tendenze leggermente in calo

¹⁰ Simon Michael Papalexiou, et al. "Global, Regional, and Megacity Trends in the Highest Temperature of the Year: Diagnostics and Evidence for Accelerating Trends", *Earth's Future* 6, no. 1 (2018). <https://doi.org/10.1002/2017EF000709>.

nell'HTY includono l'Alaska, alcune zone della Norvegia settentrionale, della Svezia e della Finlandia, nonché alcune zone dell'Australia nord-orientale.”

Le tendenze del periodo 1986-2015 mostrano una distribuzione dei trend di riscaldamento sostanzialmente analoga, rilevando, però, un considerevole inasprimento dei massimi di temperatura nella maggior parte delle celle.

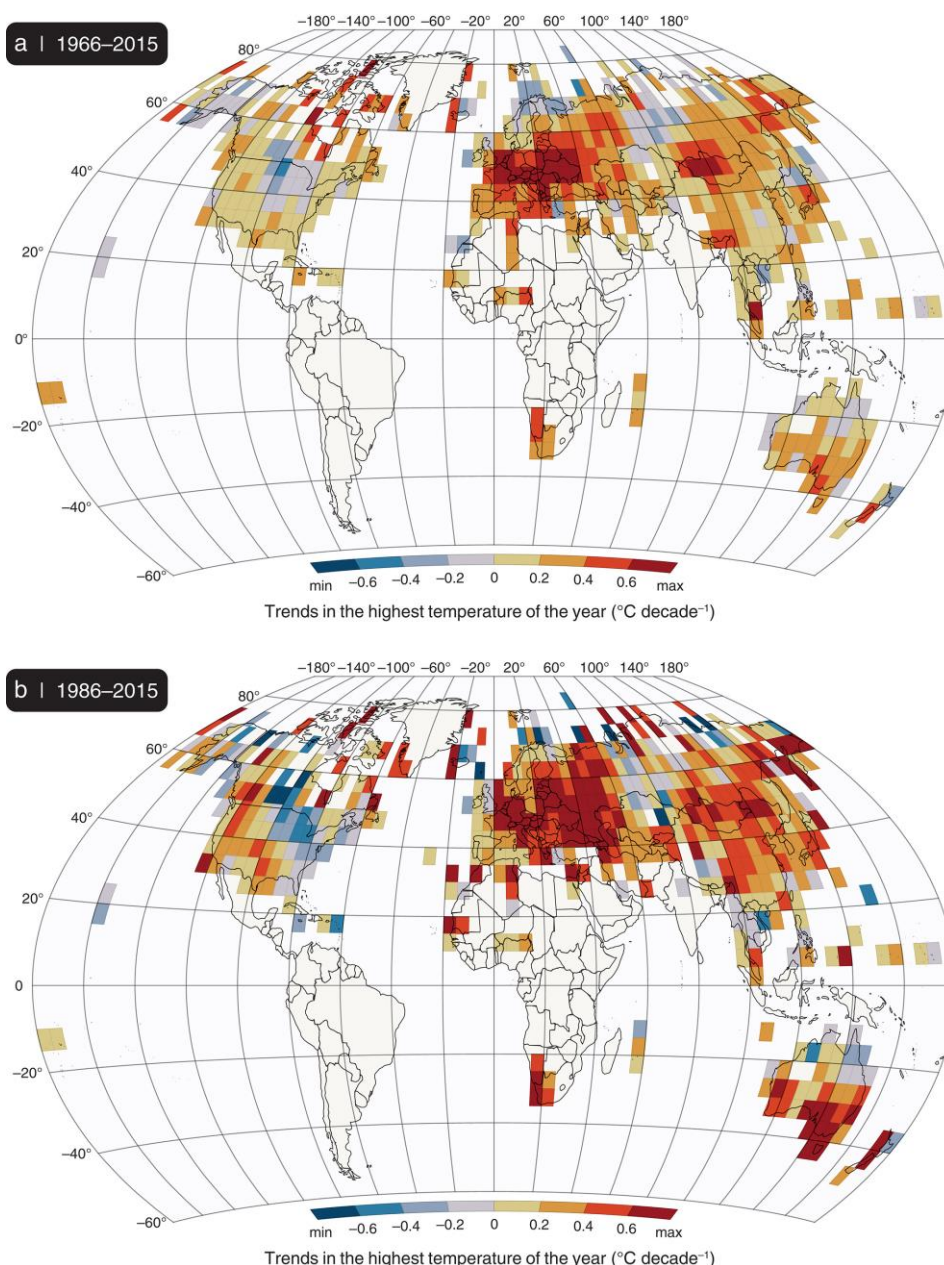


Figura 2. Tendenze di temperatura in °C per decennio osservate nell'HTY (temperatura massima annuale). I risultati sono mostrati in riquadri a griglia 5°x5°.
Fonte: Simon Michael Papalexiou, et al. “Global, Regional, and Megacity Trends in the Highest Temperature of the Year: Diagnostics and Evidence for Accelerating Trends”, *Earth’s Future* 6, no. 1 (2018)

L'aumento delle temperature massime, come già descritto per l'incremento delle minime termiche, porta conseguenze preoccupanti. Le alte temperature, infatti, causano impatti negativi per la salute, l'economia e la società¹¹, gravando su infrastrutture, trasporti, approvvigionamento idrico e domanda di elettricità, influenzano gravemente ecosistemi e foreste e aumentano l'attività degli incendi boschivi¹².

Il calore estremo accelera, infatti, l'evaporazione dell'acqua dal suolo e la traspirazione della vegetazione, determinando una progressiva riduzione dell'umidità dei terreni e una maggiore frequenza di periodi di siccità.

La vegetazione più secca e le elevate temperature favoriscono l'innescò e la rapida propagazione degli incendi boschivi, che interessano superfici sempre più estese e provocano ingenti perdite di biodiversità, oltre a contribuire all'emissione di elevate quantità di gas serra in atmosfera, generata sia dal processo di combustione che, in maniera indiretta, dalla perdita delle unità arboree in grado di stoccare CO₂ attraverso il processo di fotosintesi.

La diminuzione della disponibilità idrica compromette gli ecosistemi naturali, riduce le risorse destinate all'agricoltura e aumenta la competizione tra i diversi utilizzi dell'acqua.

Il caldo eccessivo, infatti, pregiudica la produttività agricola sia in termini qualitativi che quantitativi, poiché le colture sono maggiormente esposte a condizioni climatiche sfavorevoli. Le temperature estreme interferiscono anche con la produttività del settore zootecnico e possono provocare un aumento della mortalità degli animali negli allevamenti.

L'innalzamento delle temperature massime comporta un crescente fabbisogno di acqua ed energia per il raffrescamento degli ambienti e degli spazi destinati alle tecnologie digitali, aggravando la pressione sulle risorse naturali e sulle infrastrutture.

Tali infrastrutture, inoltre, sono soggette al rischio di deterioramento dei materiali che le costituiscono. Se esposti a temperature molto elevate, infatti, i materiali plastici e metallici,

¹¹ Omid Mazdiyasni, et al., "Increasing Probability of Mortality during Indian Heat Waves", *Science Advances* 3, no. 6 (2017). <https://doi.org/10.1126/sciadv.1700066>.

¹² Si vedano a tal proposito:

Karen E. Smoyer-Tomic, Robyn Kuhn, e Alana Hudson, "Heat Wave Hazards: An Overview of Heat Wave Impacts in Canada", *Natural Hazards* 28, no. 2-3, pp. 465-486 (2003). <https://doi.org/10.1023/A:1022946528157>;

Craig D. Allen, et al., "A Global Overview of Drought and Heat-Induced Tree Mortality reveals Emerging Climate Change Risk for Forests", *Forest Ecology and Management* 259, no. 4, pp. 660-684 (2010). <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2009.09.001>;

A. L. Westerling, et al., "Warming and Earlier Spring Increase Western U.S. Forest Wildfire Activity", *Science* 313, pp. 940-943 (2006). <https://doi.org/10.1126/science.1128834>.

con i quali sono costruite, sono soggetti a fenomeni di deformazione, degradazione e alterazioni della struttura.

In relazione all'aumento delle temperature, la conseguenza più grave per gli esseri umani è rappresentata dall'aumento dei casi di stress termico e mortalità, soprattutto tra le fasce più vulnerabili della popolazione. Tra le patologie legate allo stress termico dell'organismo vi sono colpi di calore, disidratazione, patologie cardiovascolari e respiratorie.

L'ipertermia ed i colpi di calore sopraggiungono quando la temperatura corporea aumenta oltre i valori normali a causa di un eccessivo accumulo di calore che non riesce ad essere efficacemente mitigato dai naturali sistemi di termoregolazione del corpo umano, soprattutto in presenza di condizioni ambientali ulteriormente sfavorevoli, come l'elevata umidità dell'aria e la mancanza di ventilazione.

I colpi di calore, in particolare, sono una forma grave di ipertermia causata dall'esposizione prolungata a temperature elevate, che compromette le funzioni vitali, arrivando a provocare l'arresto cardiaco dell'individuo.

Tale condizione avviene con maggiore frequenza nella popolazione in corrispondenza delle ondate di calore, ovvero durante quei periodi che registrano, per diversi giorni consecutivi, temperature eccezionalmente elevate rispetto alla media climatica di una determinata area e stagione e che sono generati da una persistenza di aree di alta pressione che favoriscono cieli sereni, forte irraggiamento solare, scarsa ventilazione e il ristagno di masse d'aria calda.

Le ondate di calore del 2003 in Europa e del 2010 in Russia, ad esempio, hanno causato, rispettivamente, quasi 70.000 e 55.000 decessi¹³, mentre solo negli Stati Uniti, nel periodo 1999–2009, sono stati segnalati in media 658 decessi all'anno dovuti al caldo eccessivo¹⁴.

Temperature sempre più elevate, in generale, favoriscono un aumento della frequenza, della durata e dell'intensità delle ondate di calore e, di conseguenza, dei rischi ad esse associati.

¹³ David Barriopedro, et al., "The hot summer of 2010: redrawing the temperature record map of Europe", *Science* 332, pp. 220-224 (2011). <https://doi.org/10.1126/science.1201224>;

Jean-Marie Robine, et al., "Death toll exceeded 70,000 in Europe during the summer of 2003", *Comptes Rendus Biologies* 331, no. 2, pp. 171-178 (2008). <https://doi.org/10.1016/j.crv.2007.12.001>;

Peter A. Stott, D. A. Stone, e M. R. Allen, "Human contribution to the European heatwave of 2003", *Nature* 432, pp. 610-614 (2004). <https://doi.org/10.1038/nature03089>.

¹⁴ Kenneth D. Kochanek, et al., "Death: final data for 2009", *National Vital Statistics Reports: From the Centers for Disease Control and Prevention, National Center for Health Statistics, National Vital Statistic Reports* 60, no. 3, pp. 1-116 (2011).

In generale, però, è importante segnalare come gli esperti ritengano che gli effetti delle temperature estreme di un solo giorno siano paragonabili all'aumento del rischio di morbilità e mortalità derivante da condizioni estreme prolungate¹⁵.

Le ondate di calore risultano particolarmente pericolose soprattutto in città, dove sono esacerbate dal fenomeno dell'isola di calore.

Per “fenomeno dell'isola di calore” si intende l'aumento della temperatura dell'aria e delle superfici all'interno delle aree urbanizzate rispetto alle zone rurali circostanti¹⁶. Tale differenza termica è una conseguenza di come sono costruite e pianificate le città.



Figura 3. Rappresentazione schematica del fenomeno dell'isola di calore
Fonte: Fuladlu, Riza, Ilhan 2018

All'origine del fenomeno, infatti, vi sono, in primo luogo, i materiali impiegati nella costruzione degli edifici e delle infrastrutture urbane. Asfalto, cemento, laterizi e conglomerati cementizi presentano un'elevata capacità di assorbire la radiazione solare e di accumulare energia termica durante le ore diurne. La vicinanza tra gli edifici, spesso molto alti, inoltre, determina la formazione dei cosiddetti “canyon urbani”¹⁷, nei quali la

¹⁵ Si vedano a tal proposito:

Brooke G. Andreson, e Michelle L. Bell, “Weather-related mortality: how heat, cold, and heat waves affect mortality in the United States”, *Epidemiology* (Cambridge, Mass.) 20, no.2, pp. 205-213 (2009);

Antonio Gasparini, e Ben Armstrong, “The impact of heat waves on mortality”, *Epidemiology* (Cambridge, Mass.) 22, no. 1, pp. 68-73 (2011);

Daniel Oudin Åström, Bertil Forsberg, e Joacim Rocklöv, “Heat wave impact on morbidity and mortality in the elderly population: A review of recent studies”, *Maturitas* 69, no. 2, pp. 99-105 (2011).
<https://doi.org/10.1016/j.maturitas.2011.03.008>.

¹⁶ IPCC, *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability*. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, a cura di H.-O. Pörtner, et al., Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA (2022).
doi:10.1017/9781009325844.

¹⁷ T. R. Oke, “Canyon geometry and the nocturnal urban heat island: Comparison of scale model and field observations”, *Journal of Climatology* 1, no. 3, pp. 237–254. <https://doi.org/10.1002/joc.3370010304>.

radiazione solare viene riflessa ripetutamente tra le superfici verticali, aumentando l'energia assorbita dagli edifici che si riscaldano. Il calore così immagazzinato dal costruito viene rilasciato lentamente durante la notte, impedendo un efficace raffreddamento dell'ambiente urbano.

La ridotta presenza di vegetazione e la progressiva impermeabilizzazione del suolo, provocata dalla diffusione di superfici asfaltate e pavimentate, riduce la disponibilità di umidità superficiale, diminuendo la capacità del territorio di dissipare calore mediante processi evaporativi. In aree naturali, infatti, una significativa parte dell'energia solare viene normalmente impiegata per l'evaporazione dell'acqua e non incide sul riscaldamento dell'aria.

Un ulteriore contributo negativo è fornito dalla configurazione geometrica degli ambienti urbani: tale configurazione ostacola la ventilazione naturale, favorendo il ristagno delle masse d'aria calda e degli inquinanti atmosferici.

Il calore prodotto dalle attività umane, quali il traffico veicolare, gli impianti industriali, i sistemi di climatizzazione, le reti informatiche, ecc. incrementa ulteriormente l'energia termica del sistema città e ne aggrava il riscaldamento complessivo.

Nei centri urbani, il tema del cambiamento climatico si intreccia anche con disuguaglianze sociali e povertà.

L'impossibilità di mantenere una temperatura confortevole dentro casa e negli spazi pubblici durante le ondate di calore a causa della mancanza di risorse economiche, infrastrutture adeguate ed accesso alle tecnologie non affligge allo stesso modo le diverse fasce sociali della popolazione¹⁸. Le periferie e le classi popolari pagano il prezzo più alto. Per i più poveri, infatti, non è sempre possibile dotare la propria abitazione di tecnologie per il raffrescamento della casa e di sistemi di isolamento termico e ciò li espone maggiormente alle conseguenze delle ondate di calore.

I quartieri periferici e meno abbienti sono, inoltre, spesso costruiti e progettati con standard urbanistici più essenziali, che si traducono in un paesaggio poco verde e fortemente asfaltato e cementificato. Questa configurazione spaziale alimenta il fenomeno dell'isola di calore ed aumenta l'esposizione dei cittadini ai rischi che ne conseguono.

¹⁸ Giulia Boero, "Il caldo non è uguale per tutti: nelle periferie italiane cresce la Cooling poverty", la Repubblica, aggiornato il 27 giugno 2026. https://www.repubblica.it/cronaca/2026/06/27/news/il_caldo_non_e_uguale_per_tutti_nelle_periferie_italiane_cresce_la_cooling_poverty-425437103/?sc_src=email_287718&sc_lid=20362392&sc_uid=NqLjQbTh4x&sc_lid=199935&sc_customer=1ecd00316f8148afa2bac186e9106944&ref=nl-rep-f-anr.

Non si tratta solamente di un tema di discomfort, ma di un rischio concreto per la salute e la vita di chi abita queste zone.

Queste dinamiche socioeconomiche sono riassunte nel concetto di “cooling poverty”. Le strategie di adattamento e la progettazione urbana devono tenere conto di tali dinamiche e diventare lo strumento con cui risolvere queste disuguaglianze.

Sebbene il cambiamento climatico e il fenomeno dell’isola di calore siano due processi distinti, risultano intimamente legati. Il cambiamento climatico, infatti, agisce aumentando la temperatura di fondo del sistema climatico, mentre l’isola di calore determina un ulteriore incremento locale delle temperature nelle aree urbanizzate¹⁹.

L'interazione tra tali fenomeni rende le città, luogo dove vive la maggior parte della popolazione globale, uno degli ambienti maggiormente esposti agli impatti del cambiamento climatico, evidenziando la necessità e l’importanza di adottare strategie di adattamento che permettano di tutelare e garantire le condizioni di vita dei cittadini.

¹⁹ World Meteorological Organization, State of the Climate in Europe 2023 (2024).
<https://public.wmo.int/resources/publication-series/state-of-climate-europe/european-state-of-climate-2023>.

Capitolo 2: L'algoritmo per le analisi di tendenze climatiche

In questo capitolo vengono descritte le funzioni implementate all'interno del programma sviluppato in RStudio attraverso il quale è stato possibile condurre l'analisi dei trend climatici dei capoluoghi italiani. Con l'obiettivo di rendere questo progetto accessibile al maggior numero possibile di persone, indipendentemente dal loro livello e ambito di preparazione professionale, verranno descritte, in maniera semplice, le potenzialità del programma, le funzioni che è in grado di eseguire ed il loro significato statistico. L'obiettivo non vuole essere quello di fornire al lettore complesse nozioni di programmazione e statistica, ma di illustrargli le informazioni essenziali necessarie alla comprensione del processo svolto e dei risultati ottenuti dallo studio.

Il testo dello script non viene riportato direttamente in questo capitolo, ma fornito, per eventuali approfondimenti, come allegato dell'elaborato di tesi.

Perché sviluppare un codice di calcolo

L'analisi dei trend climatici richiede la gestione di grandi quantità di dati osservativi raccolti nell'arco di numerosi decenni. Le serie storiche meteorologiche, infatti, sono costituite da migliaia di osservazioni giornaliere. Per poter studiare ed interpretare correttamente queste rilevazioni, è necessario svolgere diverse operazioni di controllo, organizzazione ed elaborazione statistica dei dati. Lo svolgimento manuale di tali procedure risulterebbe non solo estremamente dispendioso in termini di tempo, ma anche maggiormente esposto al rischio di errori e difficilmente riproducibile.

In questo scenario, l'utilizzo di un linguaggio di programmazione può rivelarsi un valido alleato della ricerca.

Nell'ambito del presente lavoro è stato sviluppato un programma nel linguaggio di programmazione R, utilizzando l'ambiente di sviluppo RStudio, con l'obiettivo di automatizzare l'intero processo di analisi delle serie climatiche. Il programma consente di leggere i dataset meteorologici, verificarne la qualità, elaborarli attraverso differenti tecniche statistiche (come l'individuazione di trend climatici, l'aggregazione delle

osservazioni a differenti scale temporali e l'analisi dell'autocorrelazione delle serie storiche) e produrre automaticamente i grafici e le tabelle necessari all'interpretazione dei risultati.

È opportuno sottolineare come il software sviluppato non costituisca il fine della ricerca, bensì uno strumento al servizio dell'analisi climatica e della progettazione dell'adattamento al riscaldamento climatico. Nonostante ciò, il programma ha ricoperto un ruolo centrale nella realizzazione di questo progetto di tesi. Nei paragrafi successivi verranno illustrate le principali funzionalità dello script, introducendo contestualmente le nozioni statistiche di riferimento.

Lo script sviluppato nella fase preliminare e riportato in allegato è stato utilizzato per l'analisi climatica della città di Milano. Per gli altri capoluoghi si sono rese necessarie piccole modifiche al programma scritto per risolvere criticità specifiche di ciascuna serie di dati. Alcuni esempi di queste specificità sono la necessità di leggere un diverso formato di file con il quale sono stati forniti i dati delle rilevazioni, la gestione di eventuali discontinuità delle serie e l'adattamento ad una diversa organizzazione dei dati all'interno del file di partenza. Le funzioni centrali del programma, successivamente descritte, rimangono, invece, invariate per le cinque città.

Questo lavoro di tesi si concentra sull'analisi dei trend climatici dei primi cinque capoluoghi italiani per numero di abitanti, con una particolare attenzione ai trend relativi agli estremi di temperatura. Questi ultimi, infatti, hanno un impatto diretto e severo sulla vita delle persone in città e tale consapevolezza traina lo sviluppo di strategie di adattamento al riscaldamento climatico in ambito urbano.

Il seguente lavoro si focalizza su questa classe di tematiche e, pertanto, alcune funzioni implementate nello script non sono state effettivamente utilizzate nella fase di elaborazione ed analisi dei dati: lo studio dei trend relativi alle precipitazioni, infatti, non è stato incluso nelle fasi successive. Le funzioni che ne permettono l'esecuzione non sono state, però, eliminate dal programma per lasciare la possibilità di sviluppare, in futuro, nuovi studi che approfondiscano le dinamiche di variazione delle precipitazioni nei centri urbani e le relative strategie di mitigazione ed adattamento.

La preparazione dei dati

Il programma sviluppato dedica una prima sezione all'importazione dei dataset meteorologici e alla loro preparazione. La qualità delle elaborazioni successive dipende in maniera diretta dall'affidabilità del dataset utilizzato e, di conseguenza, dall'efficacia di questa fase preliminare.

Lo script è stato progettato per poter leggere automaticamente dati provenienti sia da file in formato Excel sia da file CSV, rendendo così il modello facilmente adattabile a sorgenti informative differenti.

Una volta importati, i dati vengono uniformati attraverso la standardizzazione dei nomi delle variabili, così da poter applicare le medesime procedura di elaborazione indipendentemente dall'organizzazione del dataset originario.

Successivamente viene costruita una variabile temporale che identifica in maniera univoca ogni osservazione giornaliera: l'informazione relativa ad “anno, mese e giorno”, viene convertita in una singola variabile di tipo “data”. Tale operazione permette di ordinare cronologicamente tutte le osservazioni e costituisce il presupposto fondamentale per qualsiasi analisi di serie temporale.

L'ordinamento cronologico delle osservazioni è una condizione indispensabile affinché sia possibile individuare eventuali evoluzioni di lungo periodo, confrontare differenti intervalli temporali o applicare tecniche statistiche specifiche per lo studio delle serie storiche. L'intero programma sviluppato è costruito attorno a questa logica, utilizzando il tempo come variabile indipendente sulla quale vengono analizzate le principali grandezze climatiche.

Terminata la costruzione della serie temporale, il programma effettua una prima verifica della qualità dei dati. In questa fase vengono individuati eventuali valori mancanti, anomalie numeriche e incongruenze presenti nel dataset.

Segue la gestione di tali valori: affinché questi dati fallaci non vengano erroneamente interpretati come misure reali, il programma li identifica e li converte in “valori mancanti” riconosciuti dal software statistico, tramite l'associazione dell'apposita sigla “NA”.

I valori così identificati sono riconosciuti automaticamente dagli algoritmi statistici come dati mancanti e gestiti secondo procedure specifiche, evitando che essi alterino il calcolo di

medie, regressioni o altri indicatori descrittivi. In questo modo diventa possibile utilizzare tutte le informazioni effettivamente disponibili senza introdurre distorsioni nei risultati finali.

Oltre ai valori mancanti, il programma verifica anche la presenza di eventuali dati anomali, ovvero osservazioni che si discostano in modo significativo dal comportamento generale della serie, probabilmente originati da errori di registrazione, trascrizione o conversione delle unità di misura.

Al termine di questa fase il dataset risulta completamente preparato per le elaborazioni statistiche successive: le osservazioni sono ordinate cronologicamente, le variabili presentano una struttura uniforme, eventuali valori mancanti sono stati correttamente identificati e le principali grandezze climatiche sono disponibili per le analisi che verranno illustrate nei paragrafi successivi.

Il calcolo della temperatura media

Completata la fase di controllo, il programma procede al calcolo della temperatura media giornaliera, ottenuta come media aritmetica tra la temperatura minima e quella massima osservate nella stessa giornata.

Sebbene tale grandezza non sia sempre disponibile direttamente nei dataset meteorologici, essa rappresenta uno degli indicatori maggiormente utilizzati negli studi climatologici. La sua introduzione in questa analisi consente di confrontare i risultati ottenuti con numerosi studi presenti in letteratura, nei quali la temperatura media costituisce uno dei principali parametri utilizzati per descrivere l'evoluzione del clima.

Il calcolo del trend lineare

Una volta preparato il dataset, il primo obiettivo dell'analisi consiste nell'individuare l'eventuale presenza di una tendenza evolutiva delle variabili climatiche nel corso del tempo.

Sebbene la semplice osservazione di una serie storica permetta spesso di intuire già se una grandezza stia aumentando o diminuendo, la notevole variabilità che caratterizza i dati meteorologici rende difficile formulare valutazioni oggettive basandosi esclusivamente

sull'interpretazione visiva dei grafici. La stima visiva dell'andamento di una serie non permette, inoltre, di stabilire accuratamente l'ordine di grandezza del cambiamento.

Si rende, pertanto, necessaria l'introduzione di strumenti statistici come la regressione lineare. Questa tecnica permette di descrivere la relazione tra una variabile dipendente (in questo caso, rappresentata da temperatura massima, temperatura minima o temperatura media) e una variabile indipendente (che nel nostro studio corrisponde al tempo), attraverso una retta che rappresenta l'andamento medio dei dati osservati.

Dal punto di vista matematico, la regressione lineare può essere espressa mediante la relazione:

$$y = \beta_0 + \beta_1 x + \varepsilon$$

dove:

y è la variabile meteorologica osservata

x rappresenta il tempo

β_0 è l'intercetta della retta

β_1 è il coefficiente angolare (o “pendenza”) della retta

ε rappresenta l'errore casuale, cioè la parte della variabilità non spiegata dal modello.

Tra questi parametri, quello di maggiore interesse nello studio dei cambiamenti climatici è senza dubbio **la pendenza (β_1)**.

Essa esprime, infatti, la velocità con cui la variabile analizzata tende a crescere o diminuire nel tempo. Dal punto di vista climatico, questo parametro assume un significato particolarmente intuitivo ed interessante: una pendenza positiva calcolata, ad esempio, sulla temperatura massima indica che, mediamente, le temperature stanno aumentando nel corso degli anni; analogamente, una pendenza negativa suggerisce una progressiva diminuzione delle massime di temperatura con il passare del tempo.

Le differenze tra i valori osservati e quelli previsti dalla retta sono definite “**residui**” e rappresentano quella parte della variabilità che non può essere spiegata attraverso un semplice andamento lineare.

Per determinare la retta che meglio rappresenta i dati osservati viene generalmente adottato il “**metodo dei minimi quadrati**”, sviluppato nel XIX secolo e ancora oggi ampiamente

utilizzato in numerosi ambiti scientifici. Tale metodo individua la retta che minimizza la somma dei quadrati delle distanze verticali tra i punti osservati e la retta stessa.

Indicando con y_i il valore osservato e con $\bar{y}_i$ il valore stimato dal modello, la quantità da minimizzare è:

$$\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}_i)^2$$

L'elevamento al quadrato evita che gli errori positivi e negativi si compensino reciprocamente e attribuisce maggiore peso agli scostamenti più elevati. Il risultato è una retta che rappresenta il miglior compromesso possibile tra tutte le osservazioni disponibili.

Oltre alla pendenza, il programma calcola automaticamente anche il relativo “**errore standard**”. Questo parametro fornisce un'indicazione dell'incertezza associata alla stima del coefficiente angolare. In termini intuitivi, un errore standard ridotto indica che la pendenza è stata stimata con maggiore precisione, mentre valori elevati suggeriscono una maggiore incertezza nella stima.

È importante sottolineare che l'errore standard non descrive la variabilità del fenomeno climatico, bensì l'affidabilità della stima ottenuta dal modello statistico. Per questo motivo, esso costituisce un'informazione complementare alla pendenza e permette di interpretare i risultati con maggiore consapevolezza.

Dal punto di vista statistico, l'errore standard della pendenza viene calcolato a partire dalla dispersione dei residui rispetto alla retta di regressione e dalla distribuzione delle osservazioni lungo l'asse temporale. La formula matematica di riferimento è:

$$SE(\beta_1^*) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}_i)^2}{(n - 2) \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}}$$

Dove:

$SE(\beta_1^*)$ è l'errore standard della stima della pendenza della retta di regressione;

β_1^* è il coefficiente angolare (pendenza) stimato della retta di regressione;

y_i è il valore osservato della variabile dipendente all'osservazione;

$\bar{y}_i$ è il valore stimato dalla retta di regressione per l'osservazione i ;

$y_i - \bar{y}_i$ è il residuo dell'osservazione i ;

x_i è il valore della variabile indipendente (ad esempio il tempo) all'osservazione i ;

$\bar{x}$ è la media dei valori della variabile indipendente;

n è numero totale delle osservazioni;

$\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}_i)^2$ è la somma dei quadrati dei residui;

$\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2$ è la somma dei quadrati degli scostamenti della variabile indipendente dalla propria media.

Nel programma sviluppato, il trend lineare viene calcolato automaticamente per ciascuna delle quattro variabili climatiche considerate e successivamente rappresentato graficamente mediante una retta sovrapposta alla serie storica originale. Parallelamente, il valore della pendenza e il relativo errore standard vengono archiviati in una tabella riepilogativa, successivamente esportata insieme agli altri risultati dell'analisi. All'interno di questo elaborato, la pendenza e l'errore standard di ciascun trend lineare sono stati riportati nella didascalia del proprio grafico di riferimento, con l'obiettivo di agevolare la comprensione del risultato ottenuto.

Il calcolo del trend polinomiale

Sebbene il trend lineare costituisca uno strumento estremamente efficace per descrivere l'andamento medio di una serie temporale, esso presenta un limite intrinseco: presuppone che la variazione della variabile analizzata avvenga con un ritmo costante nel tempo. Tuttavia, i fenomeni climatici reali raramente seguono un'evoluzione perfettamente lineare. L'incremento delle temperature, ad esempio, può accelerare in determinati periodi storici, rallentare in altri oppure manifestare fasi di relativa stabilità alternate a periodi di crescita più marcata.

Per descrivere tali comportamenti risulta utile ricorrere alla “regressione polinomiale”, che consente di rappresentare relazioni più complesse tra la variabile osservata e il tempo.

La forma generale di un polinomio di grado (n) può essere espressa come:

$$y = \beta_0 + \beta_1 x + \beta_2 x^2 + \dots + \beta_n x^n + \varepsilon$$

A differenza della regressione lineare, in cui la relazione tra le variabili è descritta da una retta, la regressione polinomiale utilizza una curva la cui forma dipende dal grado del

polinomio adottato. All'aumentare del grado cresce la capacità del modello di adattarsi alle variazioni presenti nella serie storica: i polinomi di grado superiore consentono di rappresentare andamenti progressivamente più articolati, caratterizzati da più punti di flesso e di variazioni della velocità di crescita o diminuzione della variabile osservata.

In questo script è stato predisposto il calcolo dei trend polinomiali di secondo, terzo, quarto e quinto grado. Nel programma sviluppato, ciascun trend polinomiale viene calcolato automaticamente per tutte le variabili analizzate e rappresentato mediante una curva sovrapposta alla serie storica originale.

Gli output relativi ai trend polinomiali di terzo, quarto e quinto grado, tuttavia, non sono stati realmente impiegati nell'analisi presentata in questo elaborato, in quanto, all'aumentare del grado del polinomio, cresce sì la capacità del modello di adattarsi alle oscillazioni locali della serie, ma anche il rischio di rappresentare la variabilità casuale anziché il comportamento climatico generale, descrivendo il rumore invece che l'andamento climatico di fondo. Per questo motivo e nel rispetto degli obiettivi di questa ricerca, sono stati ritenuti più significativi i risultati forniti dall'analisi dei trend polinomiali di secondo grado e sono stati scartati i grafici riferiti ai trend polinomiali di terzo, quarto e quinto grado.

Le aggregazioni temporali mensili e annuali

Le serie climatiche analizzate nel presente studio sono costituite da osservazioni giornaliere. Questa scala temporale rappresenta il livello di dettaglio più elevato disponibile e permette di descrivere con precisione l'evoluzione quotidiana delle variabili meteorologiche. Tuttavia, proprio a causa dell'elevata frequenza delle osservazioni, queste serie possono risultare caratterizzate da una notevole variabilità e l'individuazione delle tendenze di lungo periodo può risultare poco immediata.

È opportuno ricordare, infatti, la distinzione tra tempo meteorologico e clima. Il primo descrive le condizioni atmosferiche osservate in un determinato momento o in un breve intervallo temporale, mentre il secondo rappresenta il comportamento meteorologico medio su periodi sufficientemente lunghi, generalmente dell'ordine di alcuni decenni.

L'aggregazione dei dati costituisce, quindi, uno strumento che consente di passare progressivamente dalla scala meteorologica a quella climatologica, riducendo l'influenza delle oscillazioni giornaliere e mettendo in risalto i fenomeni persistenti.

Per questo motivo, accanto all'analisi delle serie giornaliere, il programma sviluppato prevede anche la costruzione di serie temporali aggregate su base mensile e annuale.

Nel programma sviluppato, le modalità di aggregazione sono state definite in funzione delle caratteristiche fisiche delle variabili analizzate.

Per le temperature massime, minime e medie viene calcolata la media aritmetica dei valori osservati all'interno di ciascun mese e di ciascun anno.

Per le precipitazioni, invece, viene adottato un criterio differente: in questo caso il programma calcola la somma delle precipitazioni registrate durante il mese o durante l'anno.

L'utilizzo simultaneo delle tre scale temporali (giornaliera, mensile e annuale) costituisce uno degli aspetti qualificanti del modello sviluppato. Ciascun livello di aggregazione permette, infatti, di osservare il fenomeno da una prospettiva differente.

Le serie giornaliere conservano il massimo dettaglio informativo e consentono di apprezzare l'elevata variabilità che caratterizza le condizioni meteorologiche. Le serie mensili rappresentano un compromesso tra dettaglio e sintesi, evidenziando con maggiore chiarezza l'alternanza delle stagioni e l'evoluzione delle variabili nel medio periodo. Le serie annuali, infine, eliminano gran parte delle oscillazioni di breve durata e permettono di cogliere con maggiore immediatezza le tendenze climatiche di lungo periodo.

Il confronto tra differenti livelli di aggregazione permette, quindi, di verificare la coerenza dei risultati ottenuti e di interpretare con maggiore consapevolezza l'evoluzione delle variabili climatiche.

Una volta costruite le serie aggregate, il programma applica automaticamente le stesse procedure statistiche già descritte per le osservazioni giornaliere. Per ciascuna variabile vengono calcolati il trend lineare, i trend polinomiali e i relativi grafici, rendendo possibile il confronto diretto tra le differenti scale temporali senza modificare la metodologia di analisi.

L'autocorrelazione delle serie temporali

Le tecniche illustrate nei paragrafi precedenti consentono di descrivere l'evoluzione media delle variabili climatiche nel corso del tempo. Tuttavia, le serie temporali possiedono una

caratteristica fondamentale che non può essere descritta esclusivamente mediante il calcolo dei trend: la dipendenza tra osservazioni appartenenti a istanti temporali differenti.

Nel caso delle variabili climatiche, infatti, le osservazioni consecutive non sono generalmente indipendenti tra loro. Una giornata particolarmente calda tende, con elevata probabilità, a essere seguita da un'altra giornata relativamente calda; analogamente, un anno caratterizzato da temperature superiori alla media può essere seguito da anni che presentano condizioni simili. Questa persistenza temporale rappresenta una delle proprietà fondamentali delle serie climatiche e viene studiata attraverso il concetto di autocorrelazione.

L'autocorrelazione misura il grado di somiglianza tra una serie temporale e una copia della stessa serie traslata nel tempo. In altre parole, essa permette di valutare quanto il valore assunto da una variabile in un determinato istante sia correlato con quello osservato dopo un certo intervallo temporale, detto lag.

Il termine **lag** indica semplicemente il numero di intervalli temporali che separano due osservazioni. Nel caso delle serie mensili, ad esempio, un lag pari a 1 confronta ciascun mese con quello immediatamente successivo; un lag pari a 12 mette, invece, in relazione mesi appartenenti a due anni consecutivi. Analogamente, nelle serie annuali un lag pari a 1 confronta anni consecutivi, mentre valori maggiori consentono di analizzare relazioni che si estendono su periodi temporali più lunghi. Valori elevati ai primi lag indicano generalmente una forte persistenza temporale del fenomeno, mentre la presenza di picchi in corrispondenza di intervalli regolari può evidenziare l'esistenza di componenti periodiche o cicliche.

Dal punto di vista matematico, il coefficiente di autocorrelazione per un generico lag “k” può essere espresso come:

$$\rho_k = \frac{\sum_{t=1}^{n-k} (x_t - \bar{x})(x_{t+k} - \bar{x})}{\sum_{t=1}^{n-k} (x_t - \bar{x})^2}$$

Dove:

x_t rappresenta il valore osservato al tempo (t);

$\bar{x}$ è la media della serie;

k il lag considerato.

Il coefficiente ρ_k assume valori compresi tra -1 e +1.

Un valore prossimo a +1 indica una forte correlazione positiva: osservazioni vicine nel tempo tendono ad assumere valori simili. Un valore vicino a 0 evidenzia invece l'assenza di una relazione sistematica, mentre valori prossimi a -1 indicano una correlazione negativa, ossia la tendenza della variabile ad assumere valori opposti a una determinata distanza temporale.

Per rappresentare graficamente tali relazioni viene comunemente utilizzata la funzione di autocorrelazione, nota con l'acronimo ACF (Autocorrelation Function). Il grafico ACF riporta, sull'asse orizzontale, i diversi valori del lag e, sull'asse verticale, il corrispondente coefficiente di autocorrelazione. Ciascuna barra rappresenta quindi l'intensità della correlazione esistente tra osservazioni separate da uno specifico intervallo temporale.

Nel programma sviluppato, la funzione di autocorrelazione viene applicata alle serie mensili e annuali di tutte le variabili climatiche analizzate. Per ciascuna di esse viene prodotto automaticamente un grafico ACF, nel quale le correlazioni positive e negative vengono rappresentate mediante barre di colore differente, così da facilitarne l'interpretazione visiva.

Sebbene il presente studio non abbia come obiettivo l'identificazione quantitativa di tali ciclicità, l'analisi dell'autocorrelazione costituisce comunque un utile strumento esplorativo per comprendere la struttura delle serie temporali considerate.

L'esportazione automatica dei risultati

L'ultima fase del programma è dedicata all'organizzazione e all'esportazione automatica dei risultati prodotti durante l'analisi. Sebbene questa operazione sia secondaria rispetto alle elaborazioni statistiche descritte nei paragrafi precedenti, essa rappresenta comunque un elemento importante della metodologia sviluppata.

La produzione automatica dei grafici e delle tabelle consente, infatti, di rendere l'intero processo completamente automatizzato, semplificandone l'esecuzione e garantendo l'uniformità dei risultati. L'assegnazione automatica di un nome progressivo ai file evita possibili sovrascritture accidentali e consente di mantenere l'ordine cronologico delle elaborazioni prodotte.

Nel corso dell'esecuzione dello script vengono generate numerose elaborazioni relative alle differenti variabili climatiche e alle diverse scale temporali considerate. Ogni elaborazione viene salvata sia in formato raster, mediante immagini .png ad alta risoluzione, sia in formato vettoriale, salvato con estensione .pdf.

La parametrizzazione degli aspetti grafici

Oltre alle elaborazioni statistiche, il programma utilizza un insieme di parametri grafici definiti all'inizio dello script e applicati automaticamente a tutte le elaborazioni. Questa funzione permette di modificare e personalizzare in qualsiasi momento le principali caratteristiche estetiche degli output lasciando la possibilità all'esecutore di adattare la grafica dei risultati alle proprie esigenze.

In questo progetto, ogni famiglia di grafici è caratterizzata da una propria identità visiva, ottenuta mediante l'utilizzo di differenti tonalità cromatiche, che mira ad agevolare la lettura degli output e facilitare il confronto dei risultati ottenuti tra le diverse città.

Le serie storiche, ad esempio, sono rappresentate attraverso una colorazione neutra, scelta per concentrare l'attenzione sull'andamento dei dati osservati. I grafici relativi ai trend lineari utilizzano, invece, tonalità differenti che consentono di distinguere immediatamente la retta di regressione dalla serie originale, mentre i trend polinomiali sono rappresentati mediante una diversa palette cromatica, così da evidenziare la differente natura dell'elaborazione. Analogamente, i grafici della funzione di autocorrelazione adottano uno stile dedicato che permette di distinguerli dalle altre tipologie di rappresentazione.

Sono stati, inoltre, definiti parametri uniformi relativi alle dimensioni delle figure, alla risoluzione delle immagini, ai margini, ai caratteri tipografici e agli elementi della griglia.

Sebbene tali aspetti possano apparire esclusivamente estetici, essi contribuiscono in maniera significativa alla qualità della comunicazione scientifica, soprattutto quando quest'ultima è indirizzata ad un pubblico vario, non necessariamente formato da soli esperti, come nel caso di questo studio.

Capitolo 3: I criteri di scelta dei capoluoghi da analizzare e delle relative stazioni

In questo studio sono stati analizzati i dati climatici dei primi cinque capoluoghi italiani per numero di abitanti: Roma, Milano, Napoli, Torino e Palermo. La scelta di questo criterio si fonda sulla consapevolezza che fenomeni quali le isole di calore siano spesso esacerbati dalle dimensioni del centro urbano. Un maggior numero di abitanti genera, infatti, quasi sempre un aumento della densità abitativa e del consumo di suolo, portando ad un incremento della superficie asfaltata ed impermeabilizzata.

L'espansione di un centro urbano, inoltre, fa aumentare il numero di utenti che utilizza autoveicoli emissivi. Questo insieme di eventi si traduce nell'inasprimento delle temperature in città che induce i numerosi cittadini a rispondere al discomfort attraverso l'uso di impianti di climatizzazione, che aggravano ulteriormente la situazione.

Tali elementi sono alla base del fenomeno dell'isola di calore e sono, come già detto, quasi sempre legati alle dimensioni del centro urbano ed al numero di abitanti che vi dimora, soprattutto nei centri dove l'espansione urbana non è stata sempre guidata dalla consapevolezza e dalla prevenzione del fenomeno dell'isola di calore.

Nei cinque capoluoghi analizzati si stima che viva circa l'11% della popolazione italiana, ovvero quasi 59 000 000 abitanti. Le conseguenze del cambiamento climatico ed i rischi per la salute umana avranno, per tanto, un impatto significativo sulla popolazione del paese se non verranno compresi i fenomeni climatici che interessano queste città.

L'analisi delle serie climatiche registrate in questi centri vuole contribuire ad accrescere la conoscenza del problema del riscaldamento climatico in ambito urbano, con l'obiettivo di fornire informazioni utili a sviluppare e scegliere strategie di adattamento più urgenti e/o efficaci. Si auspica che, lo sviluppo di tali protocolli, possa portare all'ideazione di modelli di adattamento applicabili anche ad altre città italiane.

Lo studio del clima di questi capoluoghi non è, quindi, finalizzato alla sola "bonifica climatica" dei centri direttamente implicati, ma può costituire una base per lo sviluppo di idee e di standard applicabili anche ad altri centri. Questo approccio è fondamentale soprattutto se si tiene in considerazione che circa il 72,44% della popolazione italiana vive

in un'area urbana e sarà, per tanto, interessata dalle conseguenze del riscaldamento climatico in ambito urbano.

Condurre l'analisi sulle città di Roma, Milano, Napoli, Torino e Palermo permette, in aggiunta, di analizzare un campione di centri urbani molto eterogeneo. I 5 capoluoghi, infatti, differiscono per latitudine, clima, vicinanza rispetto al mare, densità abitativa, ecc. Un gruppo di centri così variegato permette di coinvolgere e rappresentare nello studio, una discreta parte dei numerosi scenari climatici che compongono la geografia italiana.

Le città di Milano e Torino esemplificano il clima temperato subcontinentale della Pianura Padana che caratterizza gran parte del Nord Italia, la città di Roma arricchisce lo studio in quanto rappresentante del clima mediterraneo a estate calda presente alle latitudini centrali della penisola, mentre Napoli e Palermo permettono di includere nell'analisi un clima mediterraneo marittimo e possono fornire un interessante esempio di come i trend climatici dei centri urbani si relazionino con la presenza del mare.

Riflettere sui risultati ottenuti tenendo in considerazione le diverse caratteristiche di ciascun centro, può far nascere spunti di riflessione interessanti sulle possibili relazioni che legano i trend climatici urbani e le peculiarità geografiche del capoluogo preso in esame.

Un difetto di questo criterio di scelta è rappresentato, invece, dalla distribuzione longitudinale dei capoluoghi: le cinque città, infatti, sono situate per lo più nell'Italia centro-occidentale, escludendo, così, dallo studio la fascia est del paese. Sarebbe, per tanto, interessante includere, in studi successivi, città situate sul versante adriatico della penisola o, più in generale, analizzare alcuni capoluoghi appartenenti alle regioni orientali dello stivale. Ciò consentirebbe di avere una visione più completa dei fenomeni climatici che interessano le città italiane e di poter sviluppare riflessioni sull'impatto che le diverse geografie, incluse quelle marine, possano avere sui trend climatici urbani.

	Capoluoghi	Regione	Popolazione [n° residenti]	Superficie [km ²]	Densità [abitanti/km ²]	Coordinate geografiche
1°	Roma	Lazio	2 745 062	1 288,19	2 131	41°53'35"N 12°28'58"E
2°	Milano	Lombardia	1 362 863	181,76	7 498	45°28'01"N 9°11'24"E
3°	Napoli	Campania	905 050	119,24	7 590	40°50'09"N 14°14'55"E
4°	Torino	Piemonte	855 654	130,00	6 582	45°04'45"N 7°40'34"E
5°	Palermo	Sicilia	626 273	160,67	3 898	38°06'56.37"N 13°21'40.54"E

Tabella 1. Tabella riassuntiva dei 5 capoluoghi italiani scelti per l'analisi e delle loro caratteristiche principali (dati Istat aggiornati al 01/01/2026)

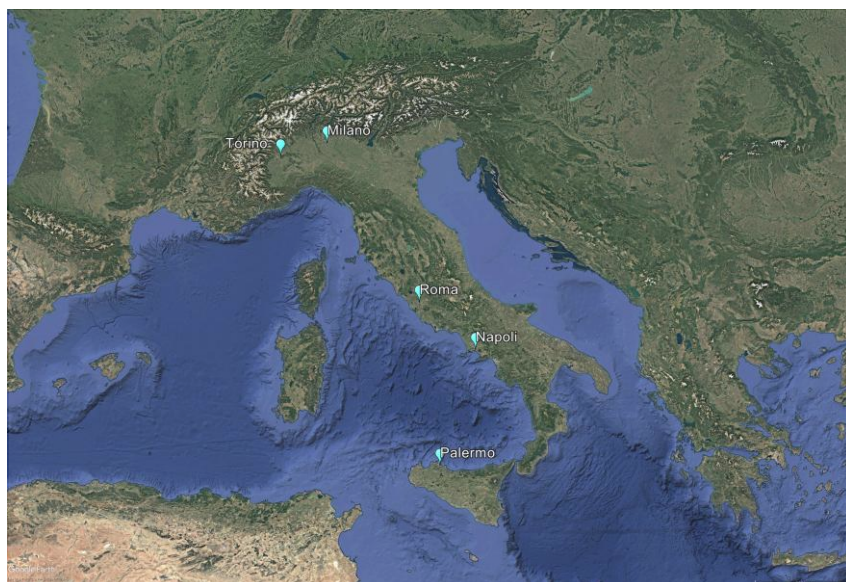


Figura 4. Mappa della penisola italiana con indicati i cinque capoluoghi analizzati

In ciascuna delle cinque area urbana selezionate per lo studio sono presenti più di una stazione di rilevamento del clima: è stato, per tanto, necessario definire un criterio da utilizzare per la scelta delle stazioni da cui estrarre i dati.

Si è deciso di condurre lo studio sulle serie temporali registrate dalle stesse stazioni meteorologiche utilizzate nel rapporto “Il clima nei capoluoghi delle regioni italiane” pubblicato nei primi mesi del 2026 da ISPRA Ambiente²⁰. Questa scelta nasce dalla volontà di permettere un dialogo tra i risultati riportati dallo studio ISPRA e gli esiti di questo progetto di tesi. La confrontabilità delle due ricerche è fondamentale al fine di creare una “rete” incrementabile di conoscenze sui fenomeni climatici che interessano i capoluoghi italiani.

Questo elaborato vorrebbe fornire nuove informazioni ed analisi per aumentare il bagaglio di nozioni fino ad ora maturato, delle quali il report ISPRA Ambiente è un esempio, a proposito di “clima e città”. Una conoscenza completa di questo argomento è fondamentale per costruire una base solida per lo sviluppo di politiche di adattamento e mitigazione degli effetti del cambiamento climatico nei centri urbani.

Le stazioni così selezionate sono state poi sottoposte ad alcune verifiche per garantire che fossero idonee al tipo di studio pensato.

Trattandosi di un’analisi sul clima dei capoluoghi italiani, si ritiene fondamentale considerare l’influenza di fenomeni quali l’isola di calore sulle temperature di questi centri. Per questa ragione è stato importante appurare che le stazioni scelte si trovassero all’interno dell’area urbana del capoluogo e non in zone periferiche o marginali, dove la presenza di aree verdi e naturali rendesse difficile registrare questo tipo di fenomeno.

Si è verificato poi che, per le stazioni identificate, fossero reperibili serie climatiche sufficientemente complete e di lunghezza adeguata, ovvero che fossero disponibili i dati climatici giornalieri degli ultimi 50 anni almeno. L’analisi di un intervallo temporale più corto avrebbe restituito risultati poco significativi. Per tutti i capoluoghi non è stato possibile includere il 2025 perché non ancora integrato nelle serie.

Per le stazioni di Milano e Torino i dati sono stati scaricati direttamente in formato .csv dal sito web di ARPA Lombardia²¹ e ARPA Torino²², mentre per le stazioni di Roma, Napoli e

²⁰ ISPRA, Il clima nei capoluoghi delle regioni italiane, Stato dell'Ambiente 103/2026, Roma, Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale (2026). <https://www.isprambiente.gov.it/it/pubblicazioni/stato-dellambiente/il-clima-nei-capoluoghi-delle-regioni-italiane>.

²¹ ARPA Lombardia, “La stazione di Milano Brera”, Temi Ambientali: Meteo e clima, consultato l’8 maggio 2026. <https://www.arpalombardia.it/temi-ambientali/meteo-e-clima/clima/la-stazione-di-milano-brera/>.

²² ARPA Piemonte, “Stazione: Torino - Serie Ultracentenarie - dati dal 1787”, Dati giornalieri serie centenaria, consultato l’8 maggio 2026. https://www.arpa.piemonte.it/rischi_naturali/snippets_arpa_graphs/dati_giornalieri_centenaria/?statid=PIE-

Palermo le serie sono state fornite direttamente da SCIA ISPRA²³, previa specifica richiesta via e-mail, in un unico file con estensione .txt.

Città	Stazione	Latitudine	Longitudine	Fonte dati
Roma	Roma Macao	41.90	12.51	SCIA ISPRA
Milano	Milano Brera	45.47	9.19	ARPA Lombardia
Napoli	Napoli Capodichino	40.85	14.30	SCIA ISPRA
Torino	Torino Giardini Reali	45.07	7.69	ARPA Piemonte
Palermo	Palermo Osservatorio Astronomico	38.11	13.35	SCIA ISPRA

Tabella 2. Tabella delle stazioni di rilevamento utilizzate per ciascun capoluogo analizzato

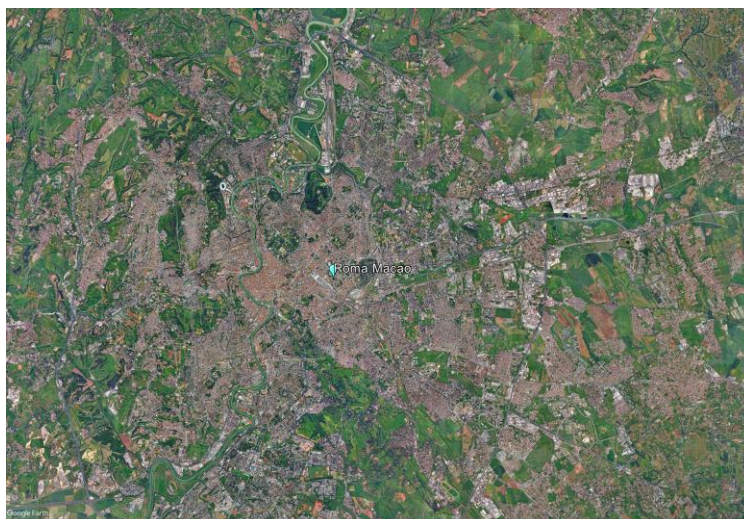


Figura 5. Mappa della città di Roma con indicata la stazione di Roma Macao

001272-100-1787-01-
01¶m=P.https://www.arpa.piemonte.it/rischi_naturali/snippets_arpa_graphs/dati_giornalieri_centenaria/?staid=PIE-001272-100-1787-01-01¶m=P.

²³ ISPRA, “Dati e Indicatori”, SCIA: Sistema nazionale per l'elaborazione e diffusione di dati climatici, consultato l' 8 maggio 2026. <https://scia.isprambiente.it/dati-e-indicatori/>.



Figura 6. Mappa della città di Milano con indicata la stazione di Milano Brera

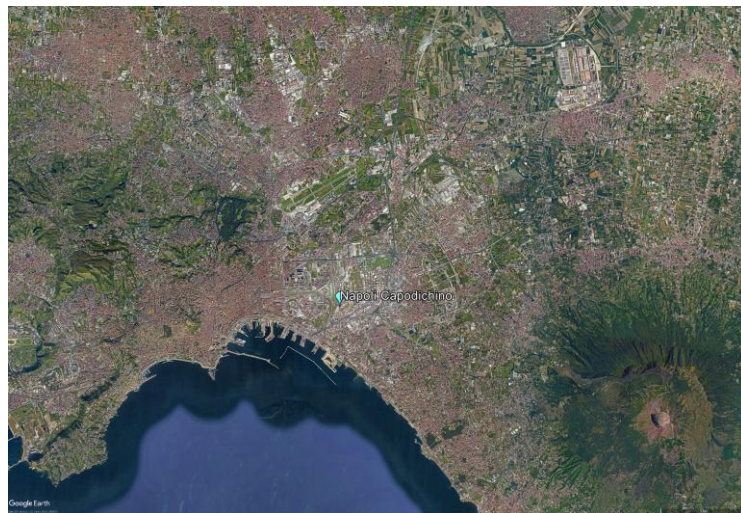


Figura 7. Mappa della città di Napoli con indicata la stazione di Napoli Capodichino

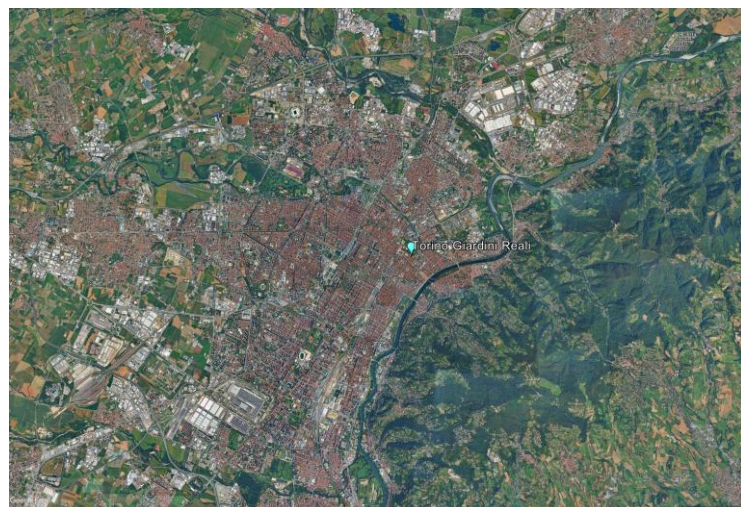


Figura 8. Mappa della città di Torino con indicata la stazione di Torino Giardini Reali

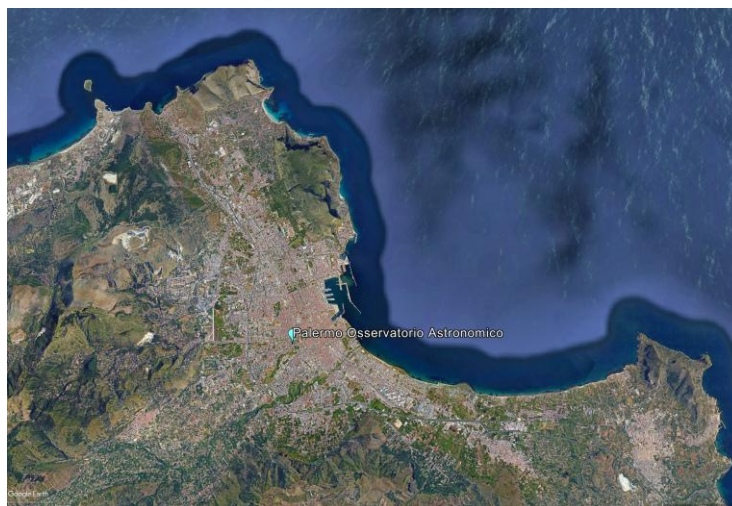


Figura 9. Mappa della città di Palermo con indicata la stazione di Palermo Osservatorio Astronomico

Le serie ottenute da ciascuna stazione presentano delle differenze nel numero di anni riportati e nel tipo di dati restituiti.

Le stazioni di Milano e Torino, ad esempio, forniscono serie giornaliere molto più lunghe delle altre stazioni. Per questi due capoluoghi sono disponibili dati climatici da prima del 1800. In questo caso si è deciso di valorizzare tale peculiarità: le serie sono state studiate per intero, anche se ciò inficia, almeno in parte, il confronto con i risultati ottenuti per le città di Roma, Napoli e Palermo.

Lo studio dei trend climatici di serie ultracentenarie è estremamente interessante in quanto ci dà la possibilità di vedere l'andamento delle temperature massime, minime e medie da prima della rivoluzione industriale del XXI secolo. Questo evento storico è, infatti, ritenuto dagli studiosi il momento che segna l'inizio dei processi antropici che sono tra le cause del riscaldamento globale.

Sulla scia di questo ragionamento possiamo dire che, in generale, è stata condotta l'analisi dei trend climatici per l'intera lunghezza delle serie, ovvero studiando il maggior numero di dati disponibili per ciascuna stazione.

I parametri di partenza considerati per questa ricerca sono la temperatura massima giornaliera, la temperatura minima giornaliera e la temperatura media giornaliera (ottenuta come media aritmetica tra la massima e la minima giornaliera). In questo progetto sono ritenute particolarmente rilevanti le analisi svolte sugli estremi di temperatura. Questi ultimi, infatti, sono un valido indicatore del comfort termico vissuto dai cittadini nella quotidianità e sono i responsabili di danni alle infrastrutture ed agli ecosistemi. L'analisi

delle temperature medie è utile a descrivere l'andamento generale del riscaldamento climatico in ambito urbano negli anni, ma non è rappresentativa dell'impatto che tale fenomeno ha, concretamente, sulle componenti del “sistema città”. Lo studio dei trend climatici dei capoluoghi non può, quindi, prescindere dallo studio dei picchi climatici proprio per il loro impatto a breve termine sugli aspetti socioeconomici, ambientali e di salute umana.

Stazione	Parametri analizzati	Anno di inizio serie	Anno di fine serie	Caratteristiche rilevanti della serie
Roma Macao	Tmax, Tmin, Tmedia	1965	2024	/
Milano Brera	Tmax, Tmin, Tmedia	1763	2024	Serie ultracentenaria
Napoli Capodichino	Tmax, Tmin, Tmedia	1951	2024	Serie con discontinuità
Torino Giardini Reali	Tmax, Tmin, Tmedia	1787	2024	Serie ultracentenaria
Palermo Osservatorio Astronomico	Tmax, Tmin, Tmedia	1929	2022	Serie con discontinuità

Tabella 3. Tabella delle stazioni di rilevamento utilizzate per ciascun capoluogo analizzato

Capitolo 4: I risultati dell'analisi

Nel seguente capitolo vengono riportati i grafici ottenuti dalle analisi svolte sui dati climatici dei diversi capoluoghi nell'ordine consequenziale con cui sono stati prodotti dal programma scritto in RStudio: per ogni parametro di temperatura (temperatura massima, minima e media) vi sarà un'analisi dei dati giornalieri, seguita dall'analisi dei dati aggregati mensilmente e, successivamente, dei dati aggregati annualmente. A conclusione vengono riportati, per ogni capoluogo, gli output ottenuti dalla funzione di autocorrelazione delle serie mensili ed annuali di ciascun parametro di temperatura.

Per ogni stazione, inoltre, verranno esposte eventuali peculiarità e/o difficoltà specifiche riscontrate durante l'analisi.

I grafici di seguito riportati vengono forniti, nel loro formato originale, come allegato di questo elaborato di tesi.

Roma – Roma Macao

Temperature massime - Serie giornaliera e trend

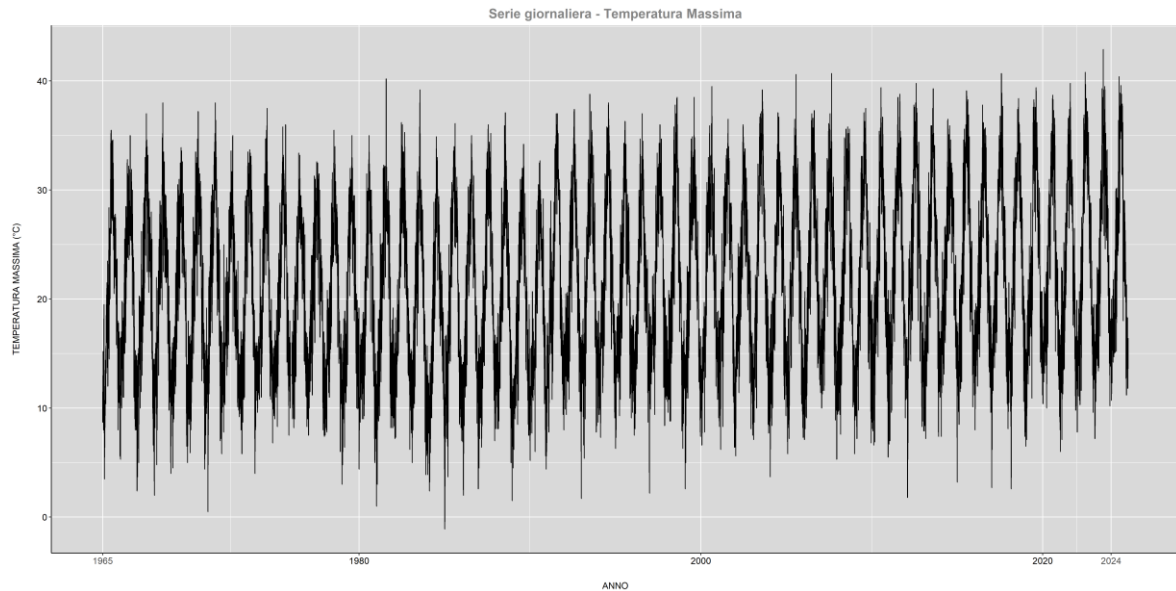


Figura 10. Serie temporale della temperatura massima giornaliera nel periodo analizzato (1965-2024) registrata presso la stazione di Roma Macao

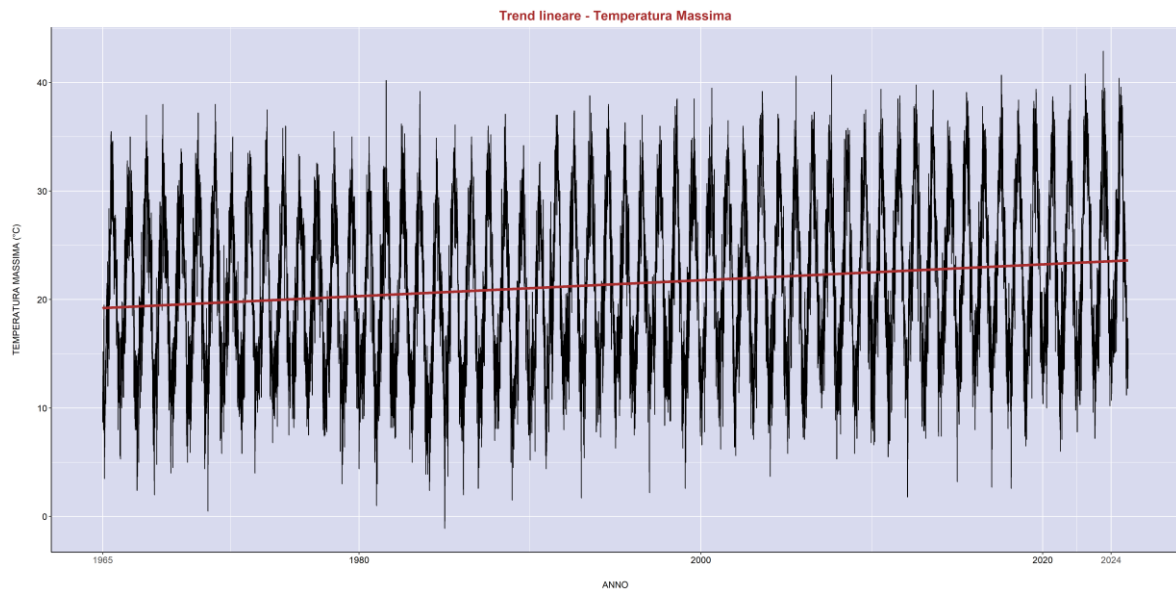


Figura 11. Trend lineare della serie delle temperature massime giornaliere
(Pendenza del trend = $0,07\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{anno}$ Errore standard = $0,003$)

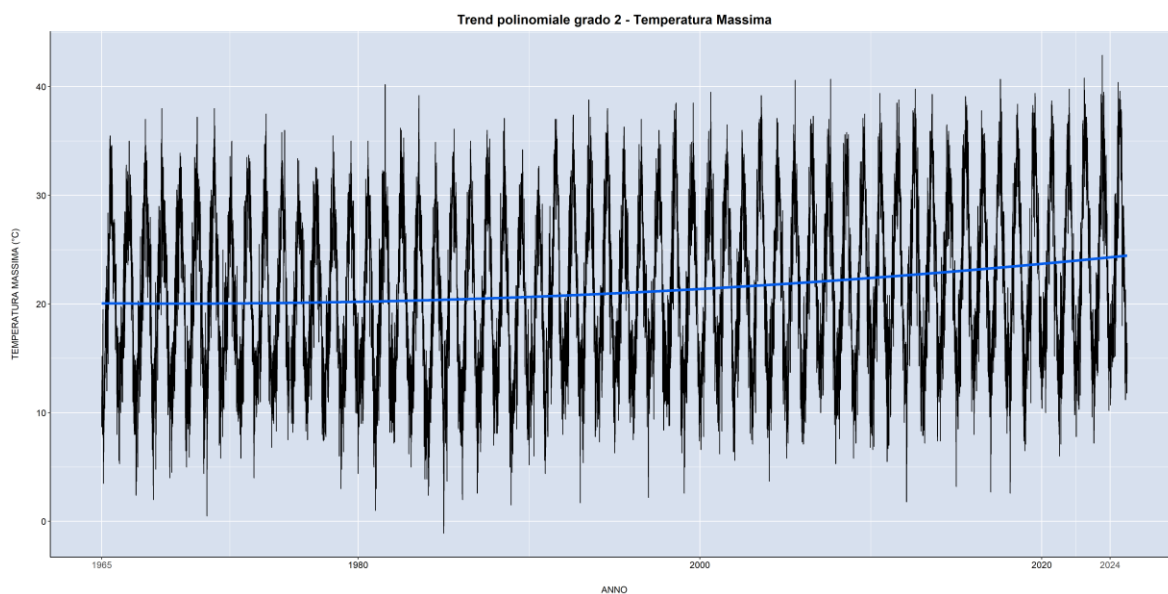


Figura 12. Trend polinomiale di secondo grado della serie delle temperature massime giornaliere

Temperature minime - Serie giornaliera e trend

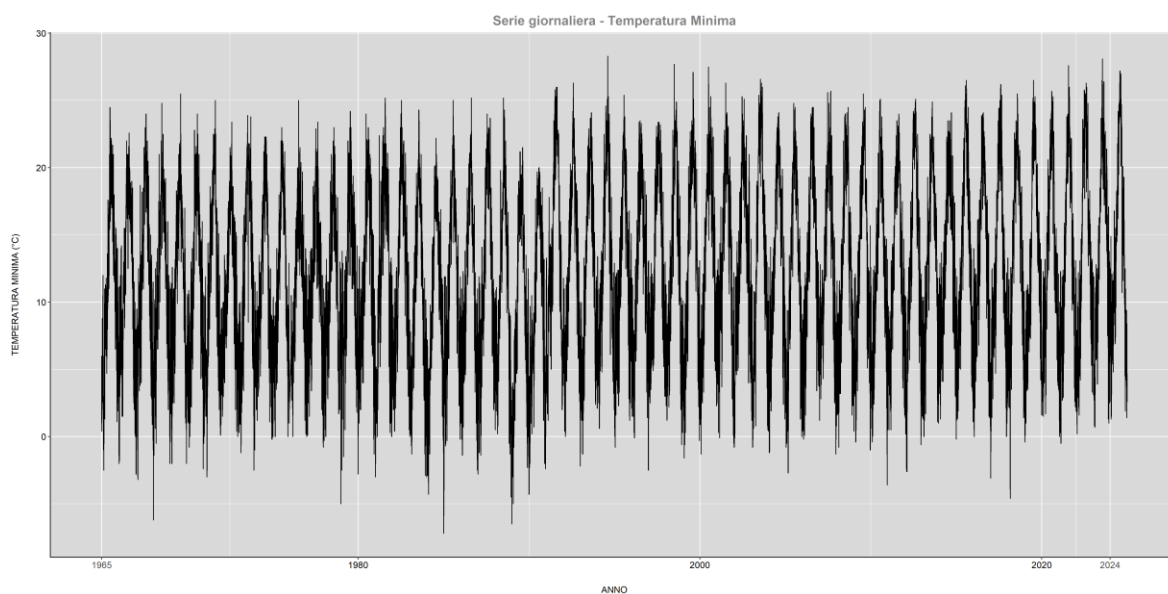


Figura 13. Serie temporale della temperatura minima giornaliera nel periodo analizzato (1965-2024) registrata presso la stazione di Roma Macao

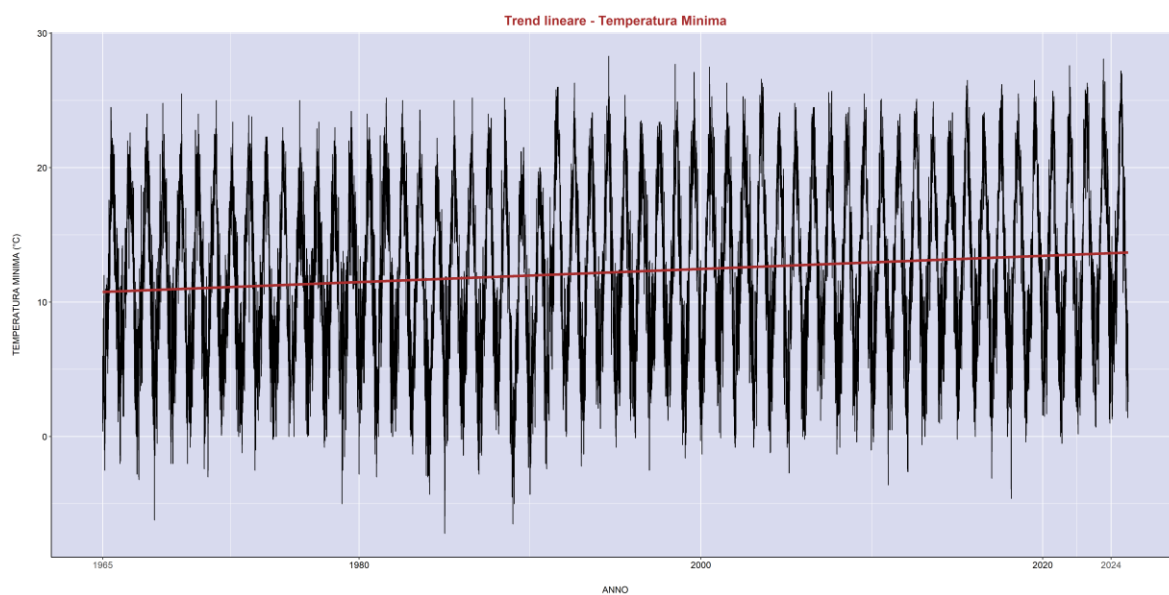


Figura 14. Trend lineare della serie delle temperature minime giornaliere
(Pendenza del trend= $0,05\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{anno}$ Errore standard = $0,003$)

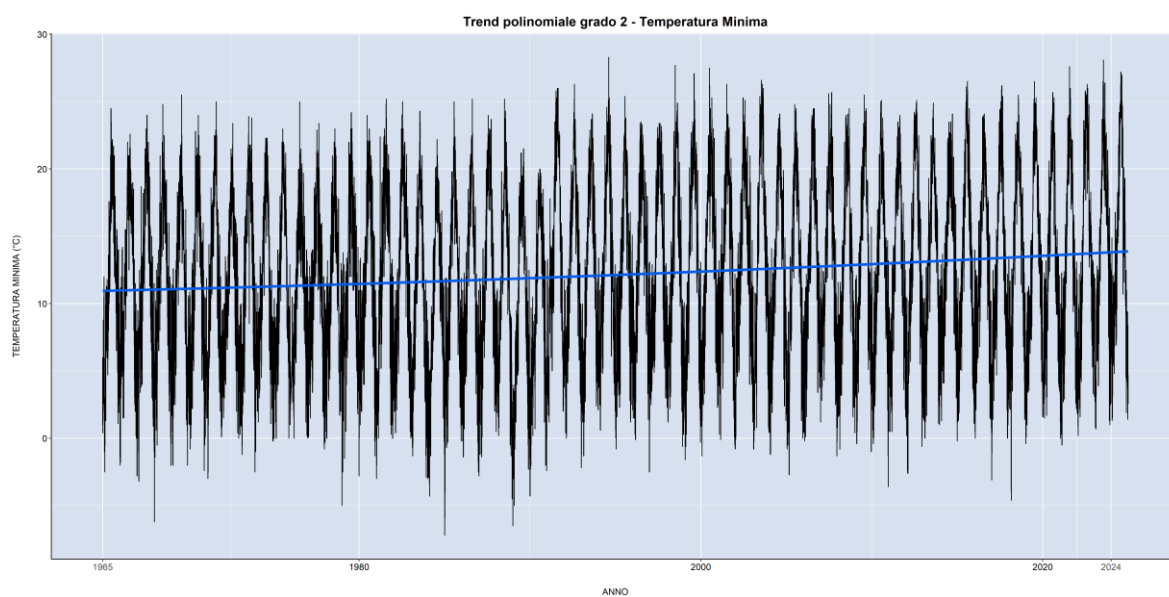


Figura 15. Trend polinomiale di secondo grado della serie delle temperature minime giornaliere

Temperature medie - Serie giornaliera e trend

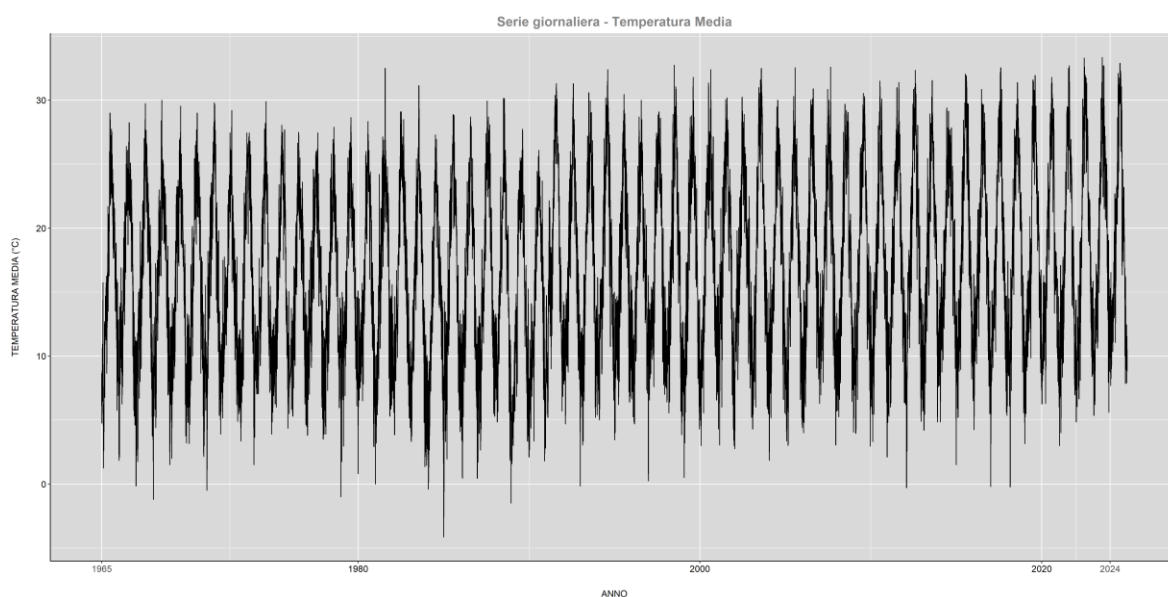


Figura 16. Serie temporale della temperatura media giornaliera nel periodo analizzato (1965-2024) registrata presso la stazione di Roma Macao

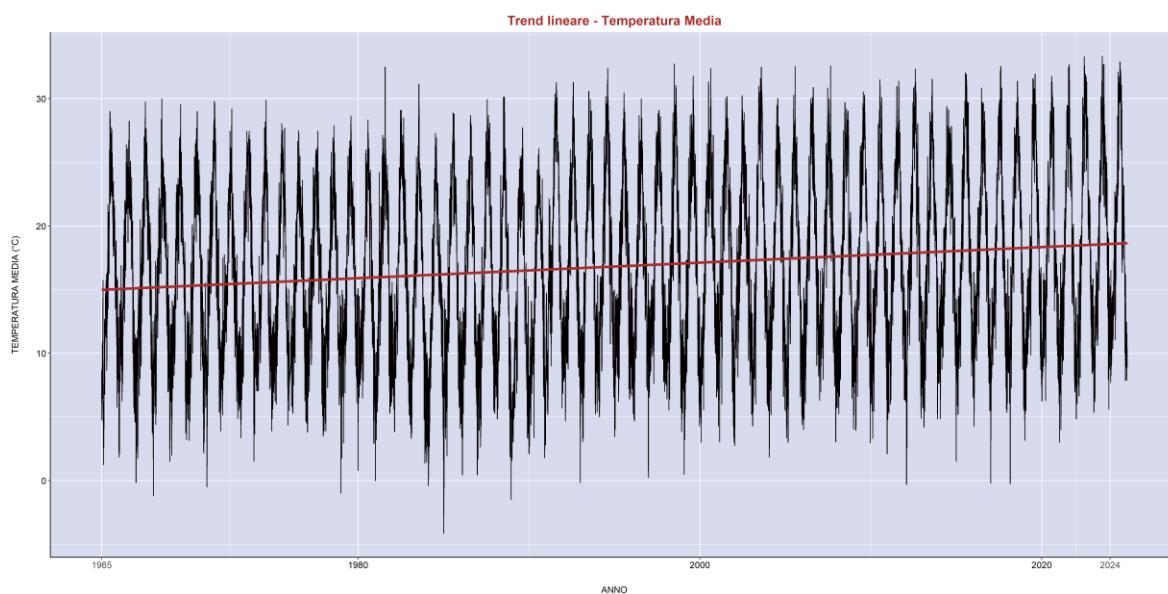


Figura 17. Trend lineare della serie delle temperature medie giornaliere
(Pendenza del trend = $0,06\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{anno}$ Errore standard = $0,003$)

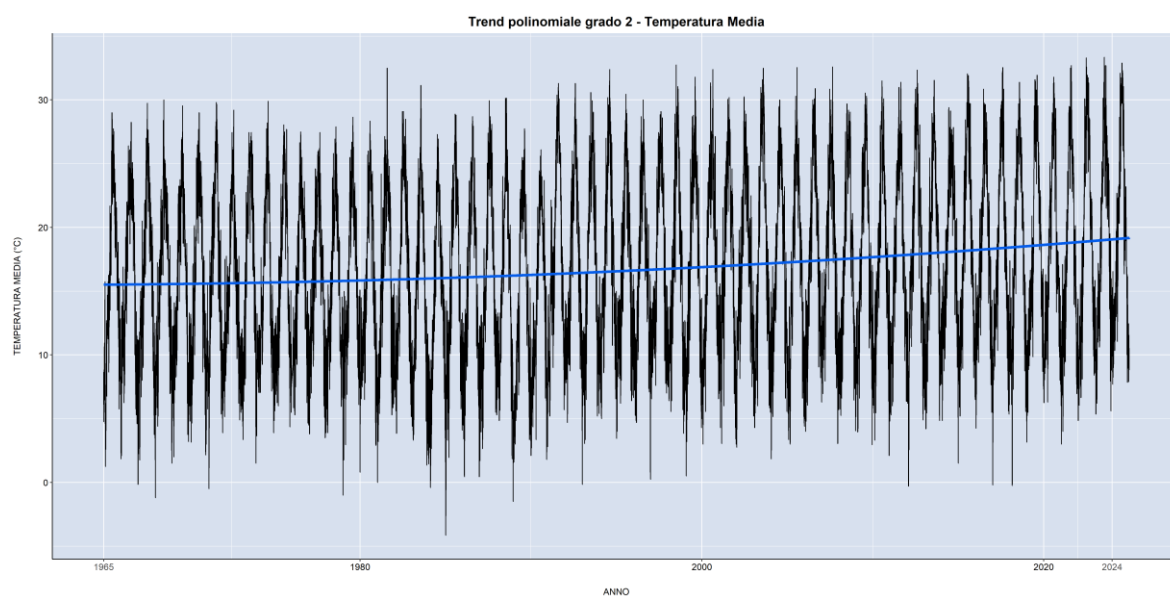


Figura 18. Trend polinomiale di secondo grado della serie delle temperature medie giornaliere

Temperature massime - Serie mensile e trend

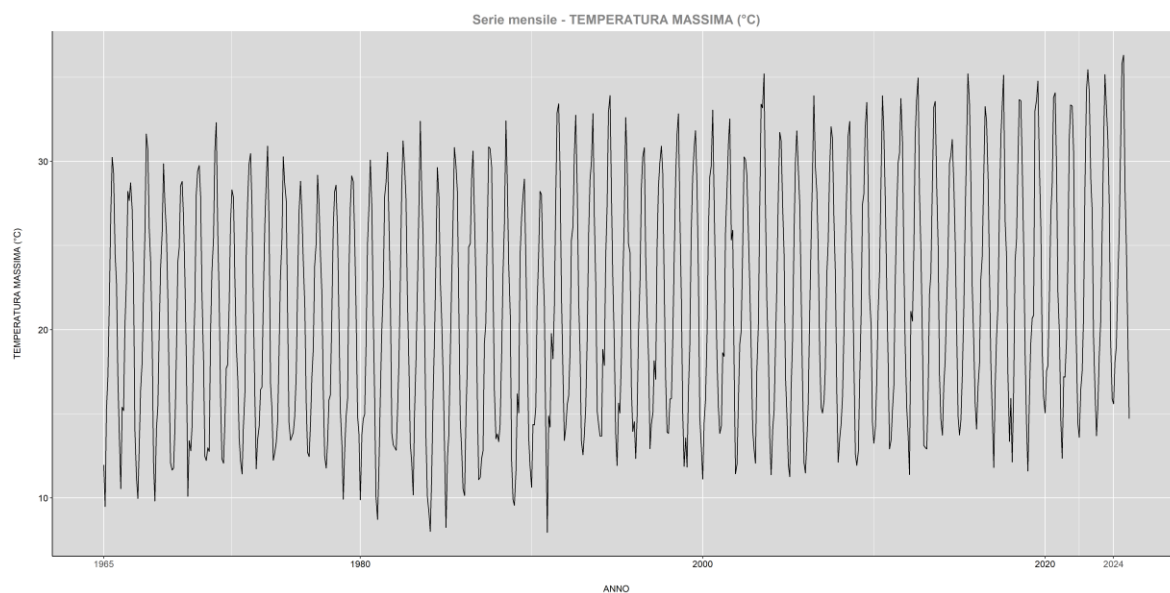


Figura 19. Serie temporale delle temperature massime aggregate mensilmente nel periodo analizzato (1965-2024) registrata presso la stazione di Roma Macao

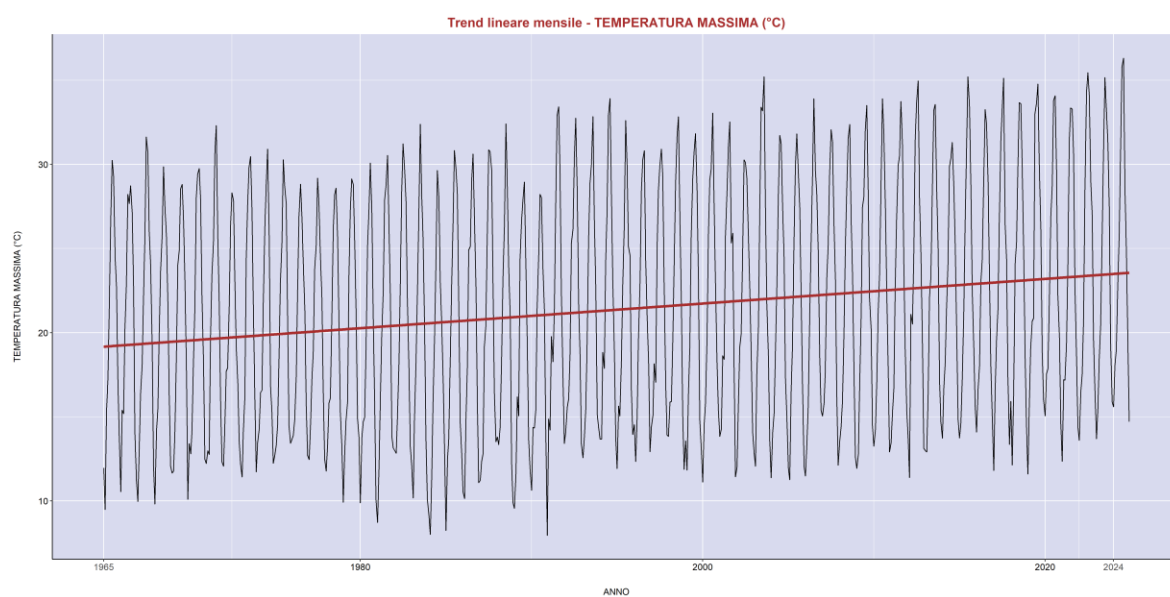


Figura 20. Trend lineare della serie delle temperature massime aggregate mensilmente
(Pendenza del trend = $0,07\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{anno}$ Errore standard = $0,02$)

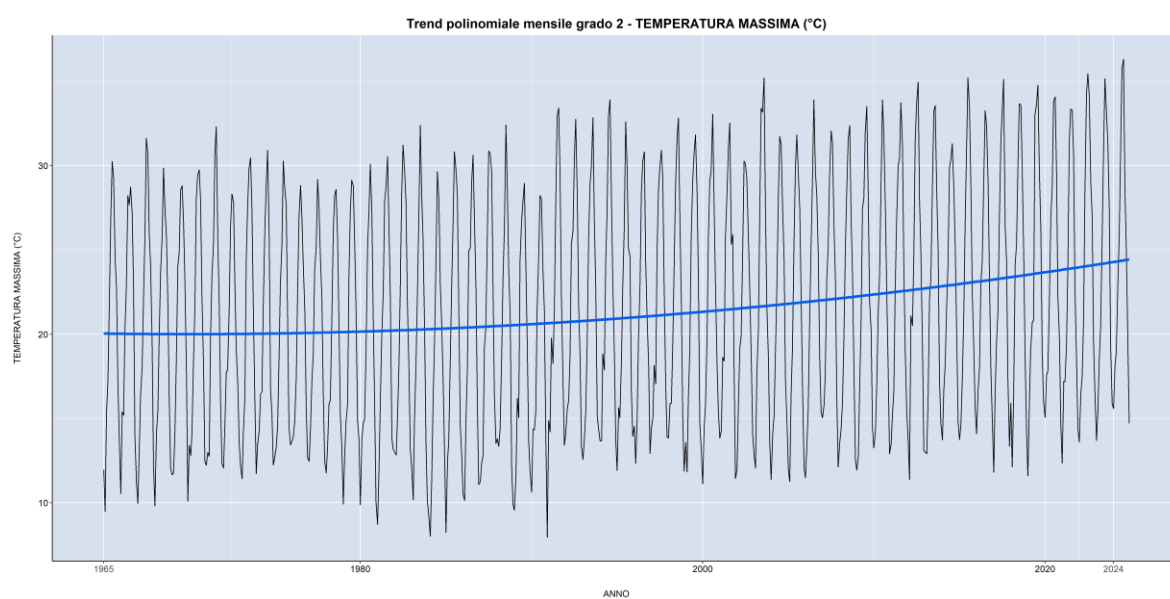


Figura 21. Trend polinomiale di secondo grado della serie delle temperature massime aggregate mensilmente

Temperature minime - Serie mensile e trend

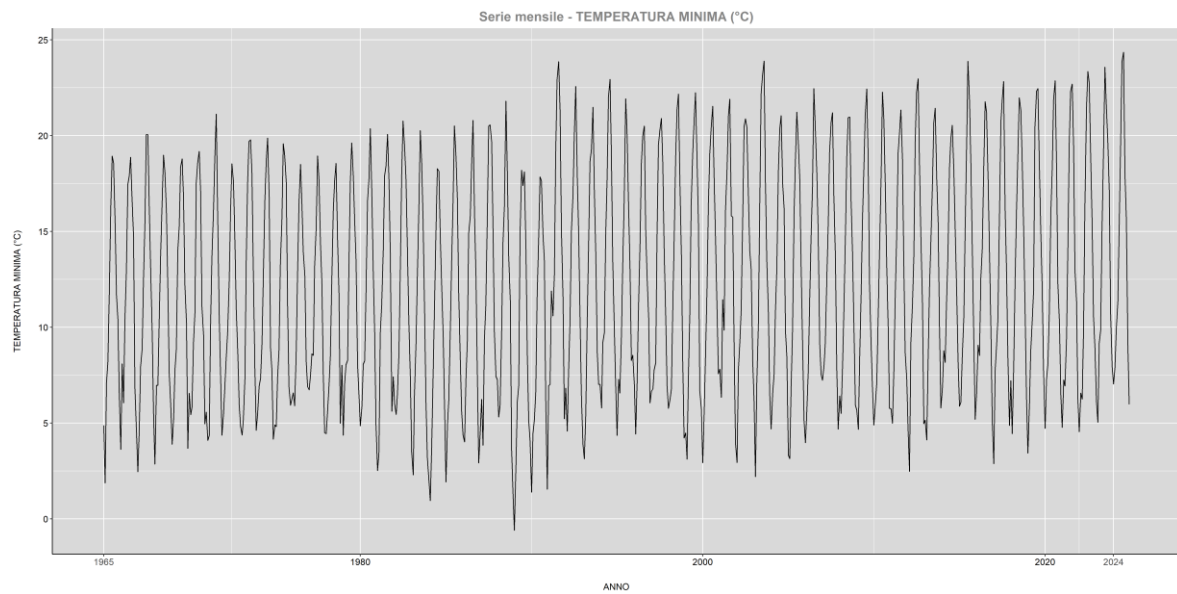


Figura 22. Serie temporale delle temperature minime aggregate mensilmente nel periodo analizzato (1965-2024) registrata presso la stazione di Roma Macao

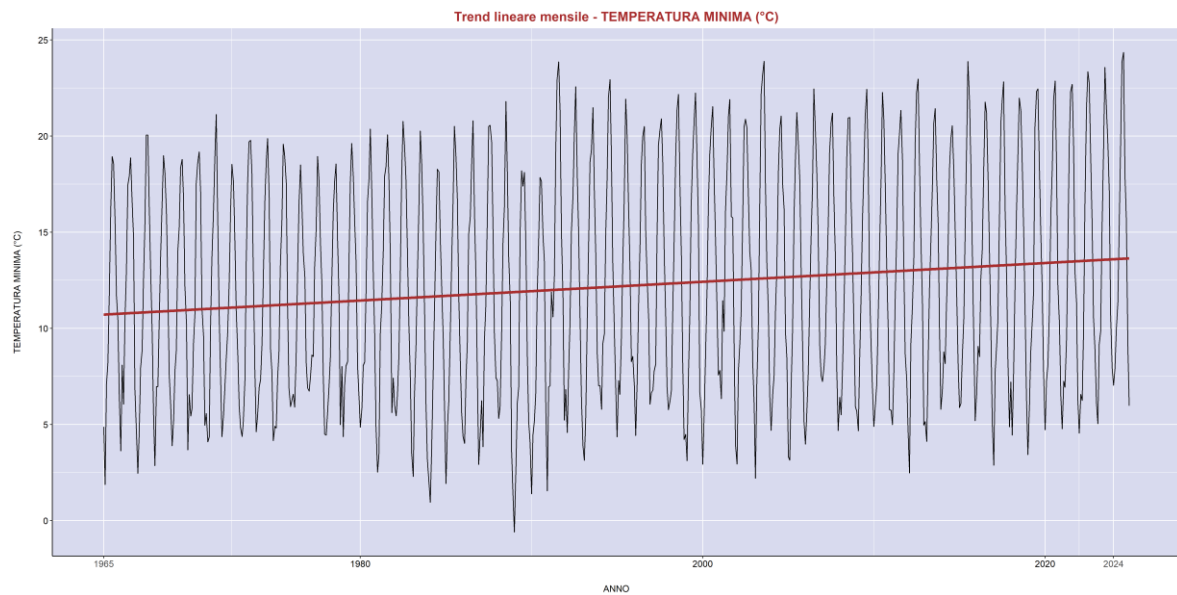


Figura 23. Trend lineare della serie delle temperature minime aggregate mensilmente
(Pendenza del trend = 0,05 °C/anno Errore standard = 0,01)

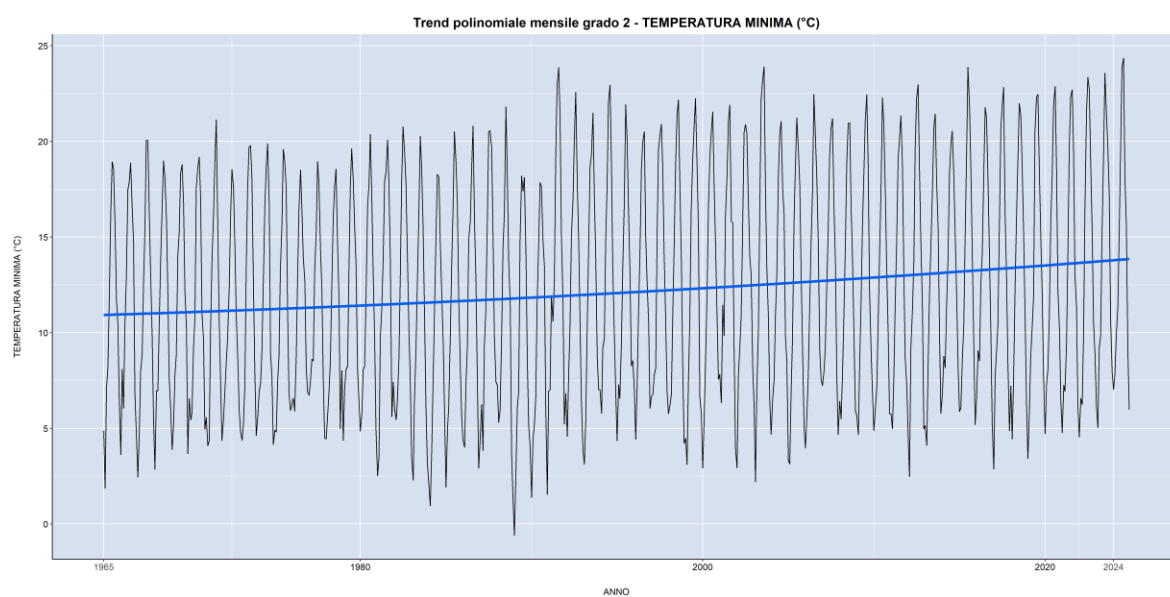


Figura 24. Trend polinomiale di secondo grado della serie delle temperature minime aggregate mensilmente

Temperature medie - Serie mensile e trend

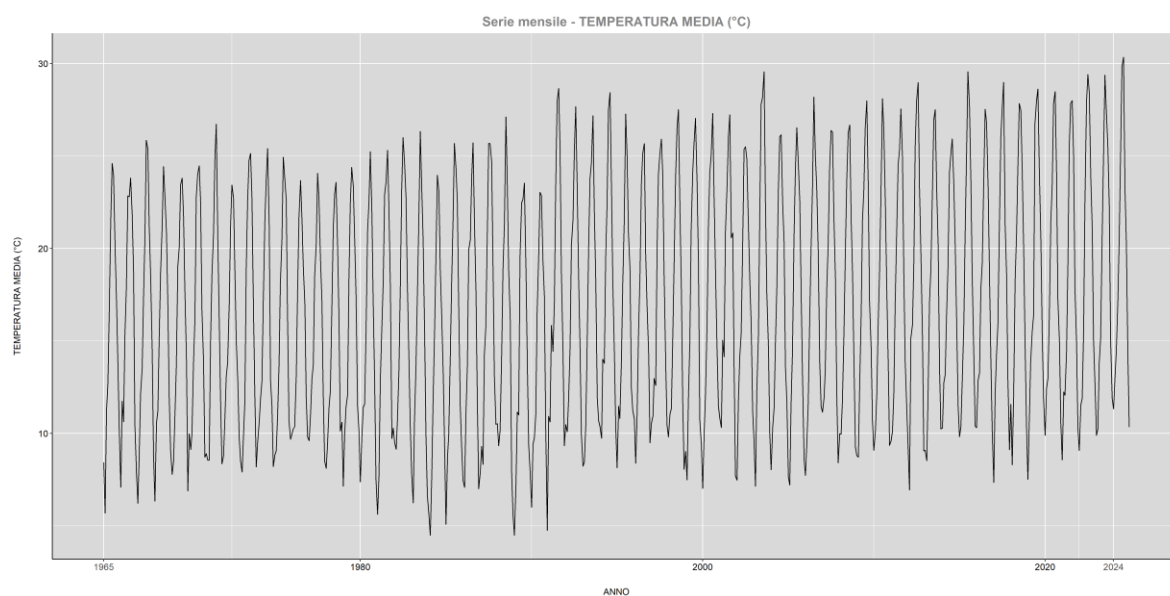


Figura 25. Serie temporale delle temperature medie aggregate mensilmente nel periodo analizzato (1965-2024) registrata presso la stazione di Roma Macao

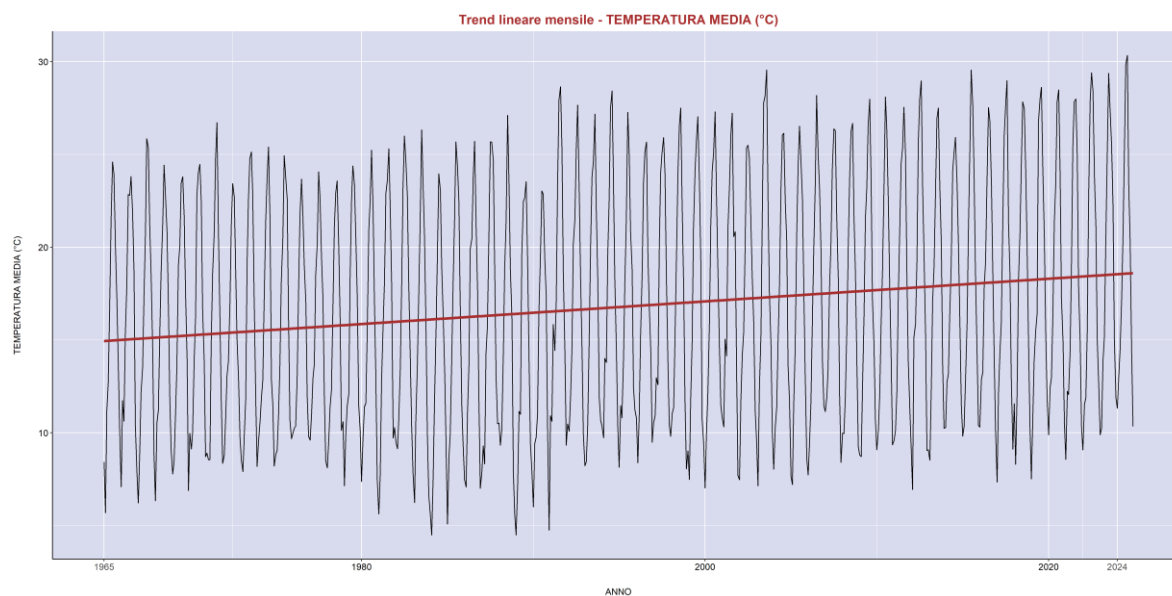


Figura 26. Trend lineare della serie delle temperature medie aggregate mensilmente
(Pendenza del trend = $0,06\text{ }^{\circ}\text{C/anno}$ Errore standard = $0,01$)

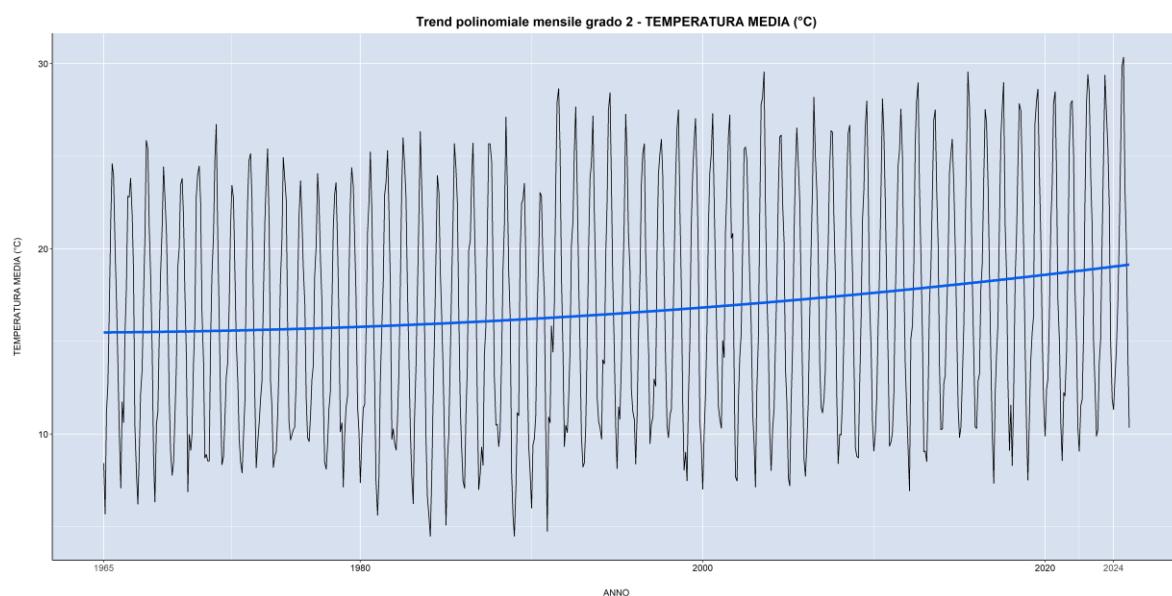


Figura 27. Trend polinomiale di secondo grado della serie delle temperature medie aggregate mensilmente

Temperature massime - Serie annuale e trend

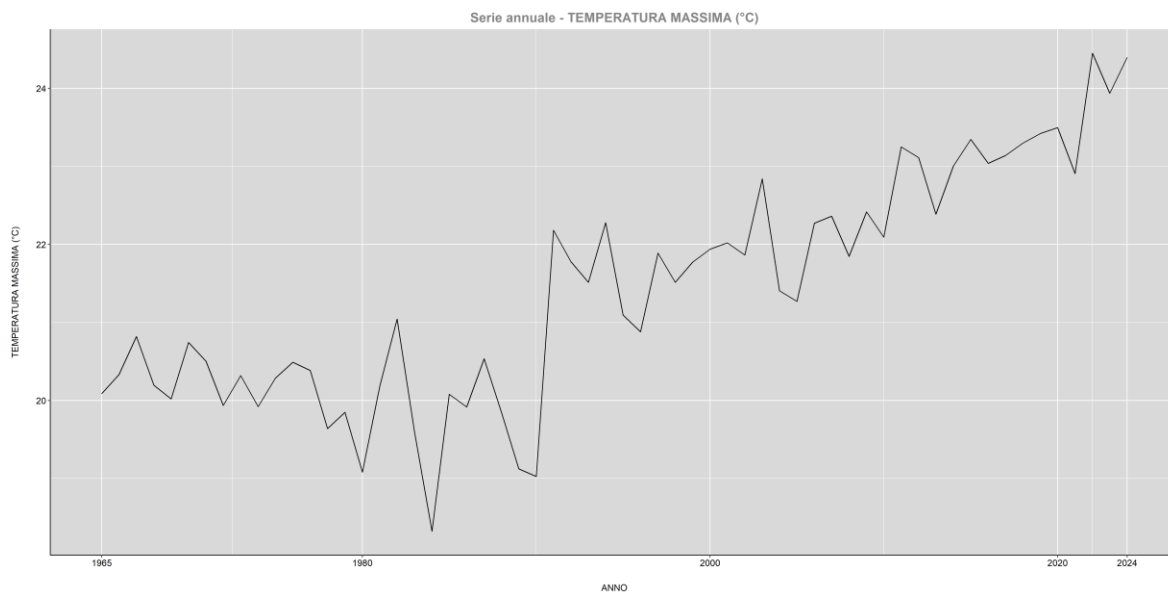


Figura 28. Serie temporale delle temperature massime aggregate annualmente nel periodo analizzato (1965-2024) registrata presso la stazione di Roma Macao

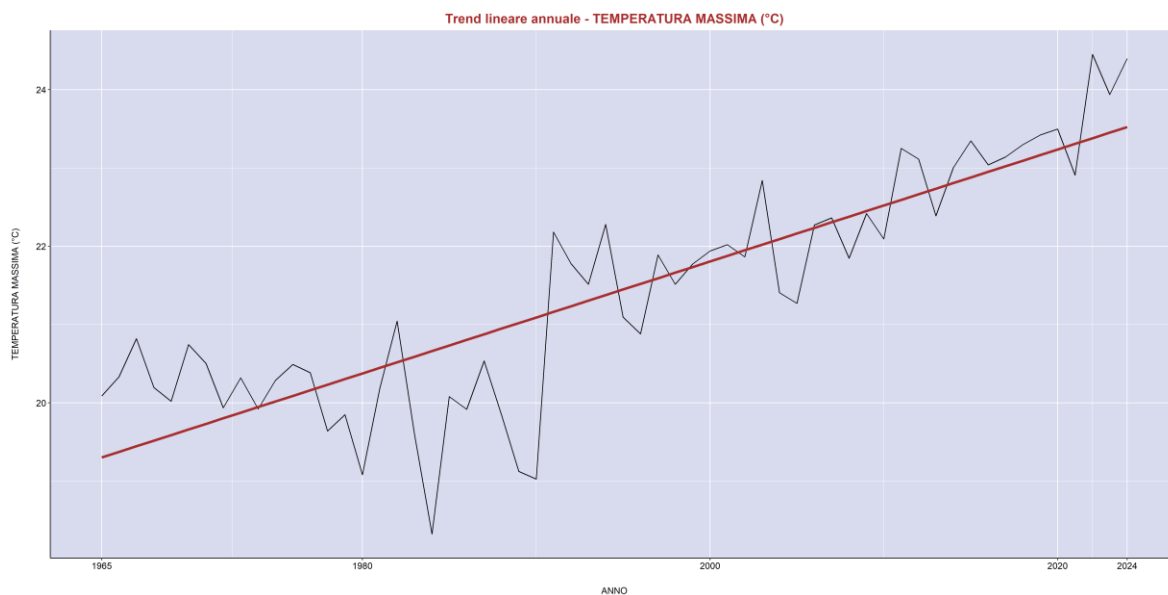


Figura 29. Trend lineare della serie delle temperature massime aggregate annualmente (Pendenza del trend = $0,07\text{ }^{\circ}\text{C/anno}$ Errore standard = $0,006$)

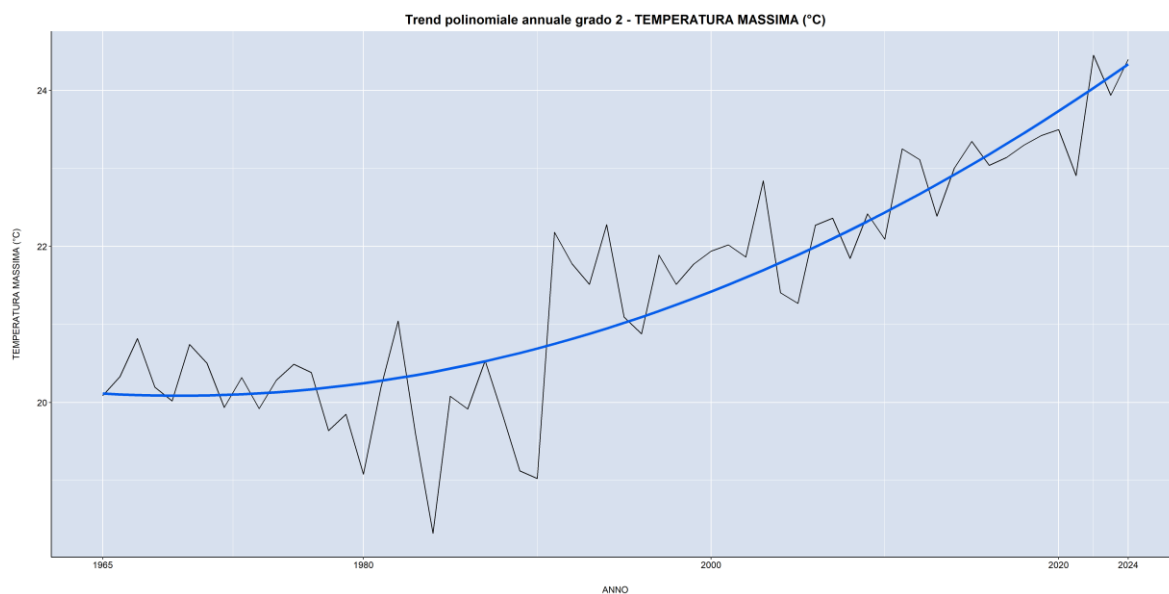


Figura 30. Trend polinomiale di secondo grado della serie delle temperature massime aggregate annualmente

Temperature minime - Serie annuale e trend

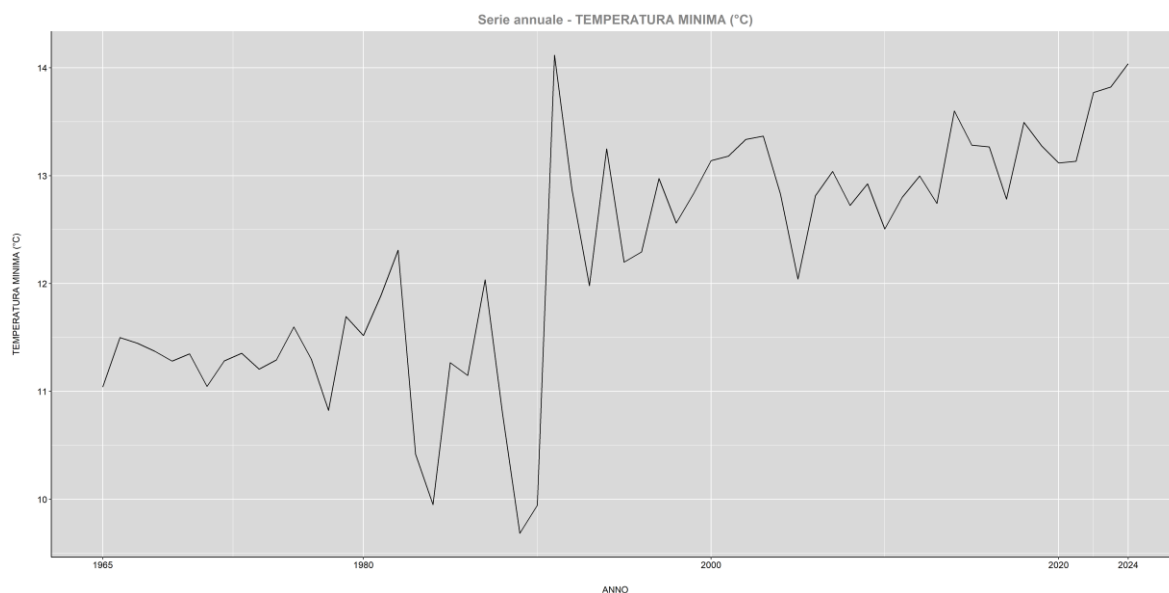


Figura 31. Serie temporale delle temperature minime aggregate annualmente nel periodo analizzato (1965-2024) registrata presso la stazione di Roma Macao

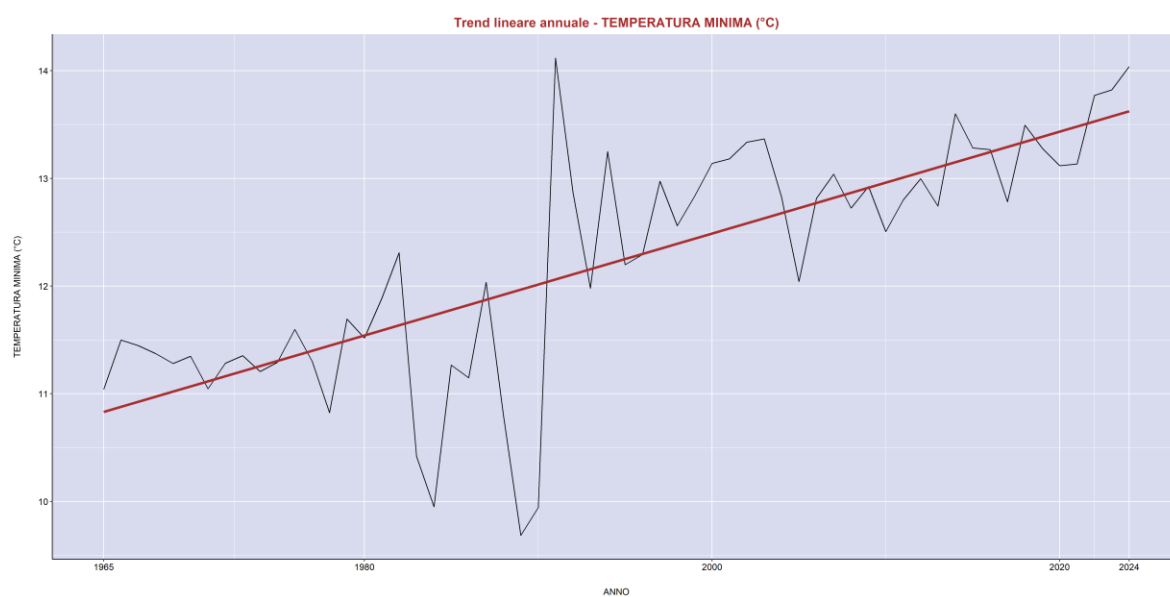


Figura 32. Trend lineare della serie delle temperature minime aggregate annualmente
(Pendenza del trend = $0,05\text{ }^{\circ}\text{C/anno}$ Errore standard = $0,005$)

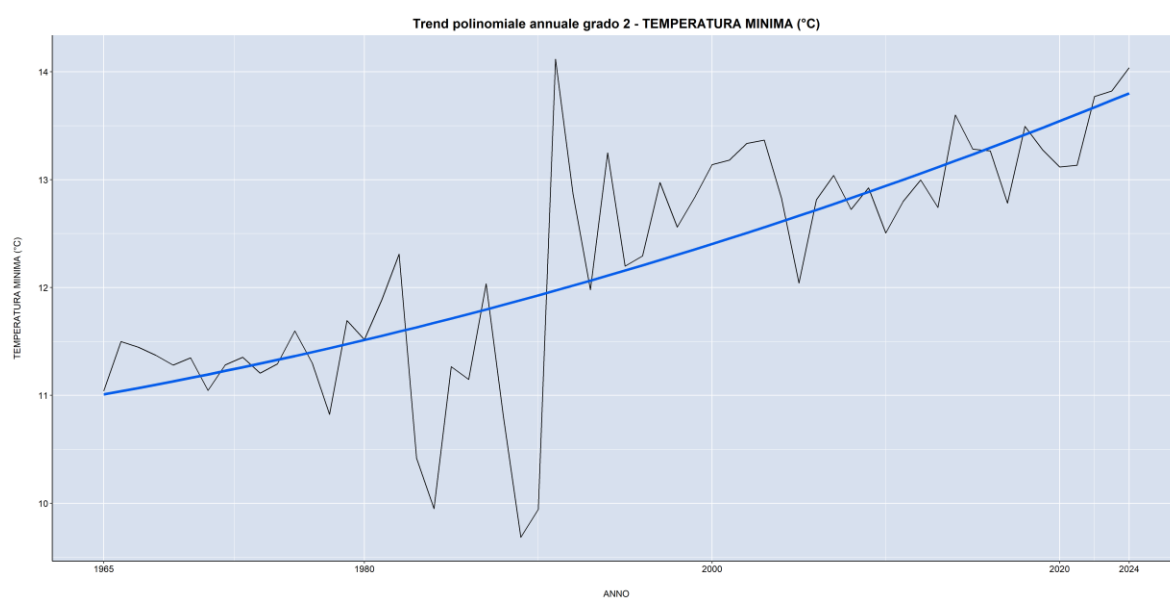


Figura 33. Trend polinomiale di secondo grado della serie delle temperature minime aggregate annualmente

Temperature medie - Serie annuale e trend

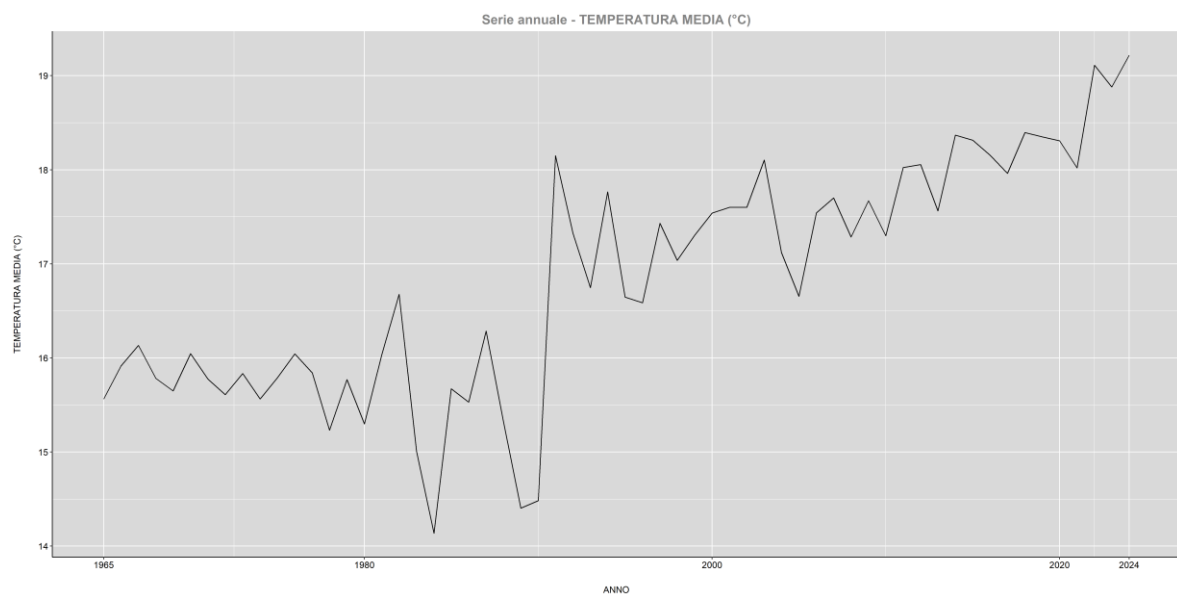


Figura 34. Serie temporale delle temperature medie aggregate annualmente nel periodo analizzato (1965-2024) registrata presso la stazione di Roma Macao

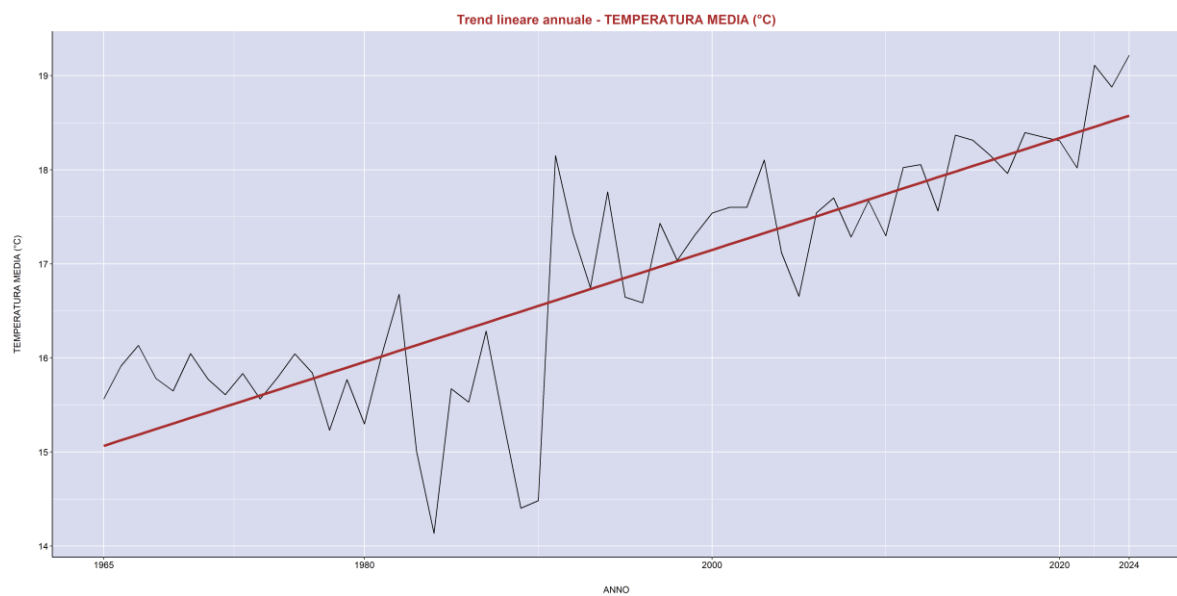


Figura 35. Trend lineare della serie delle temperature medie aggregate annualmente
(Pendenza del trend = 0,06 °C/anno Errore standard = 0,005)

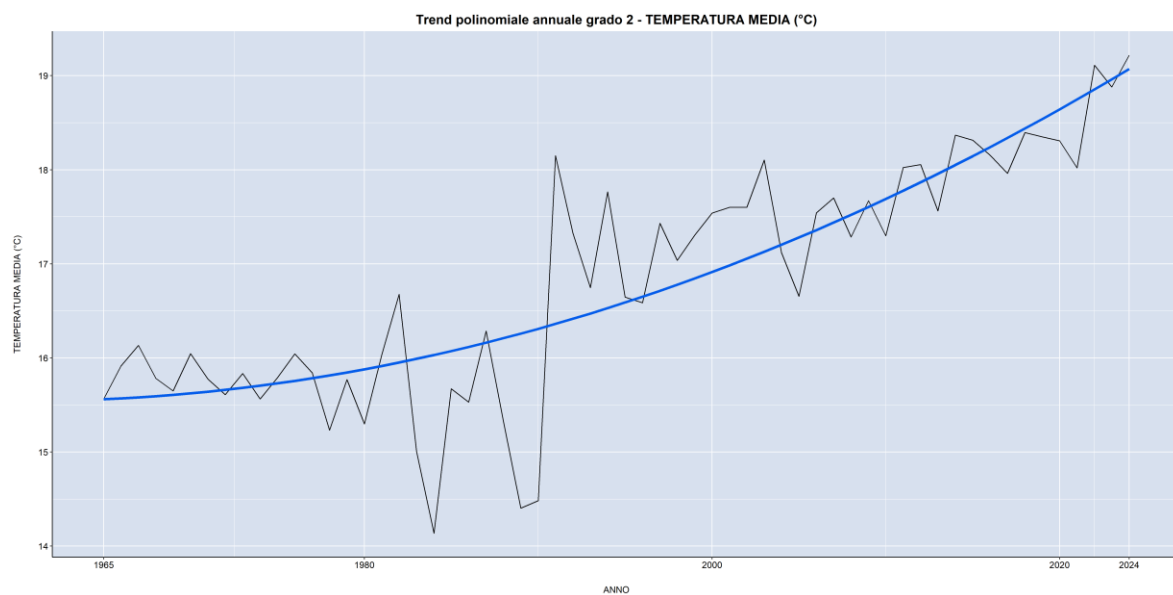


Figura 36. Trend polinomiale di secondo grado della serie delle temperature medie aggregate annualmente

Temperature massime, minime e medie - Autocorrelazione mensile

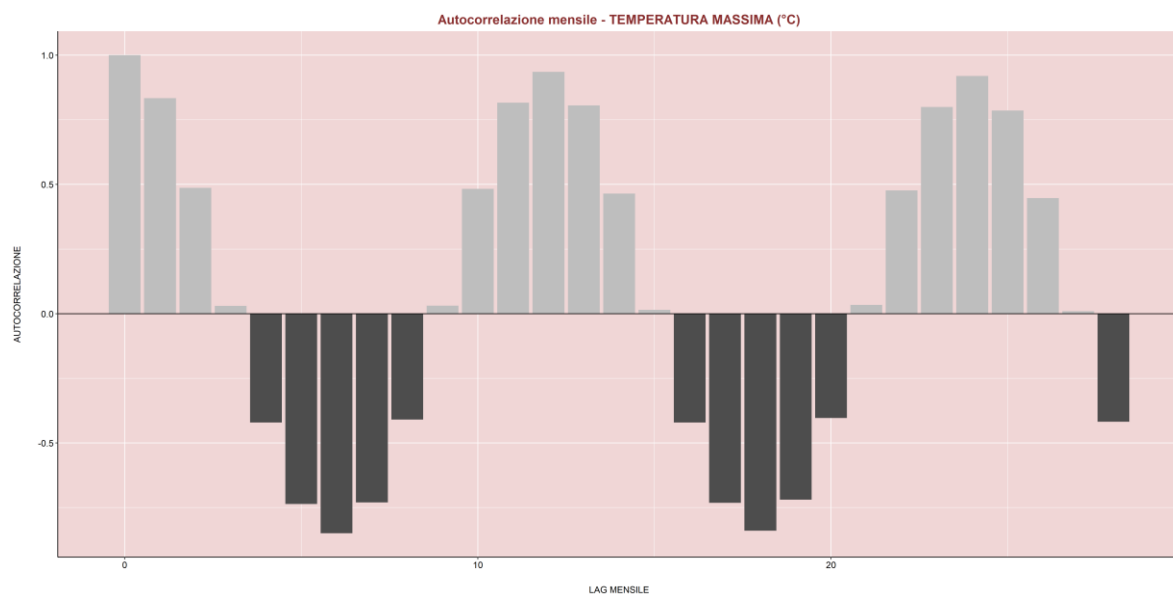


Figura 37. Funzione di autocorrelazione della serie delle temperature massime aggregate mensilmente

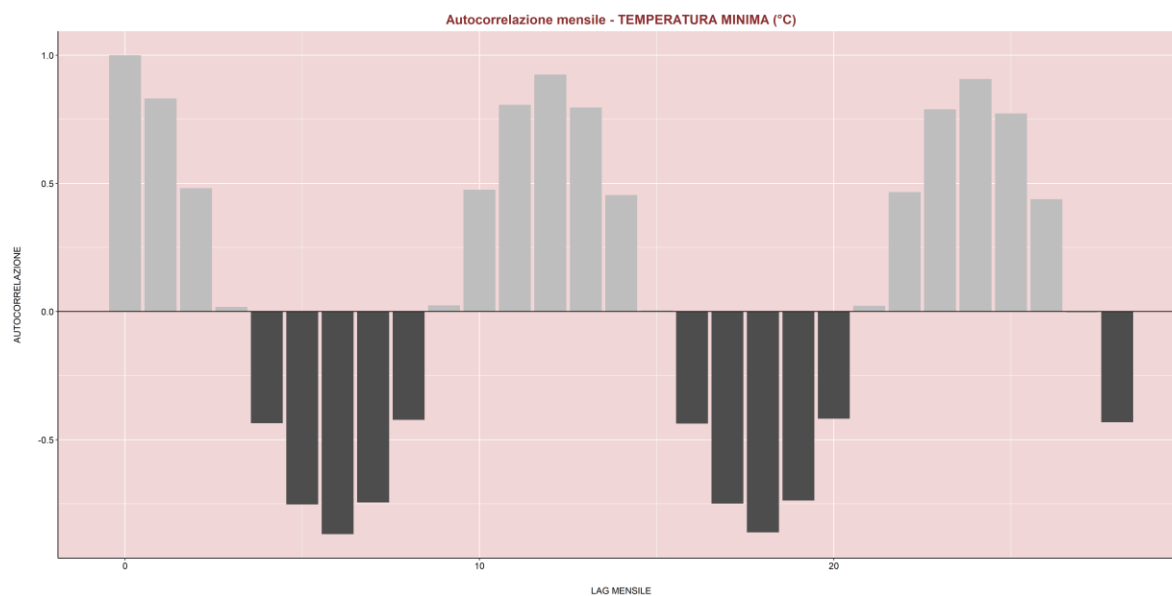


Figura 38. Funzione di autocorrelazione della serie delle temperature minime aggregate mensilmente

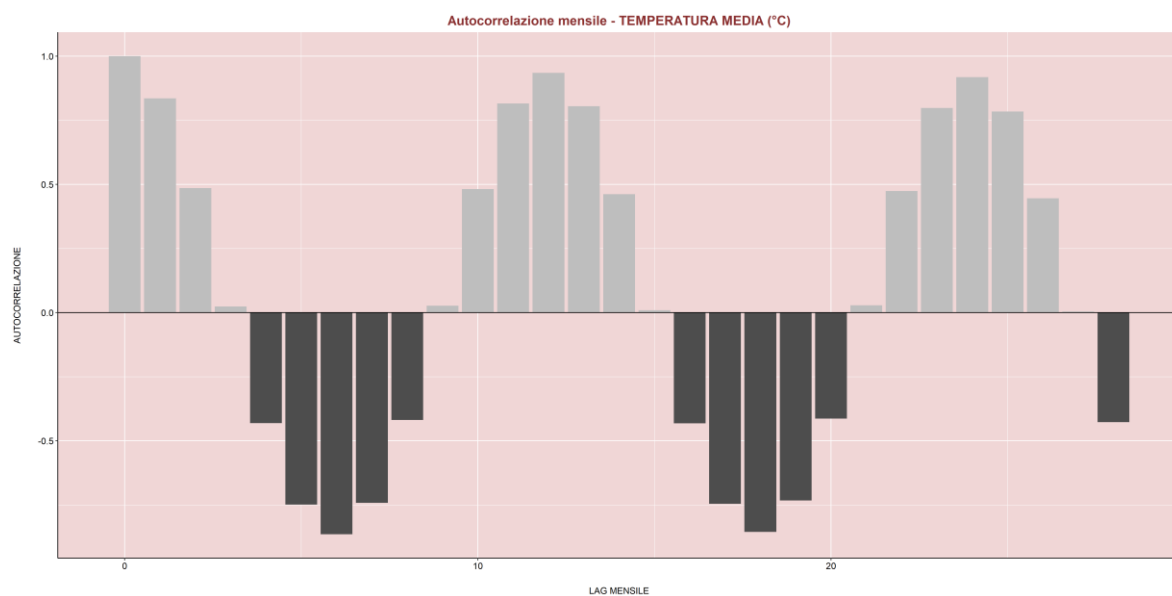


Figura 39. Funzione di autocorrelazione della serie delle temperature medie aggregate mensilmente

Temperature massime, minime e medie - Autocorrelazione annuale

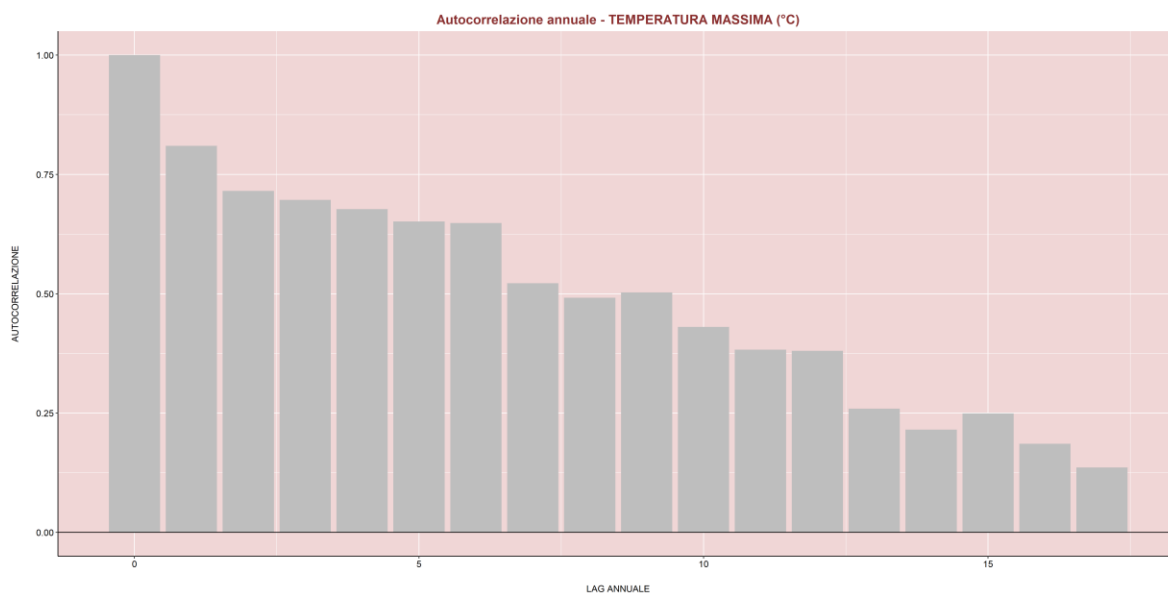


Figura 40. Funzione di autocorrelazione della serie delle temperature massime aggregate annualmente

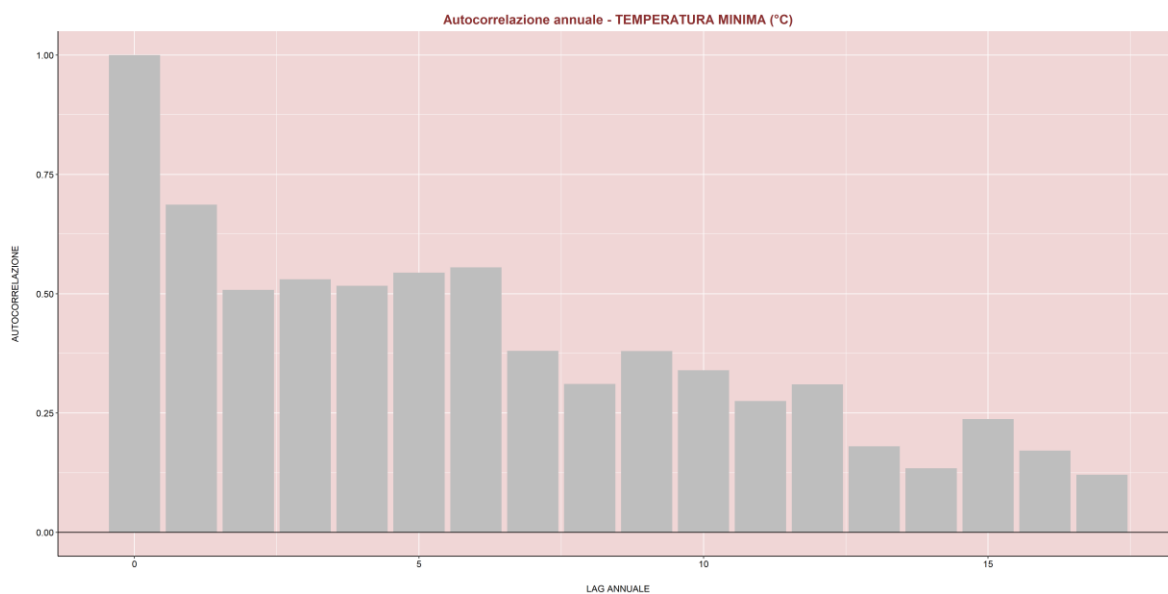


Figura 41. Funzione di autocorrelazione della serie delle temperature minime aggregate annualmente

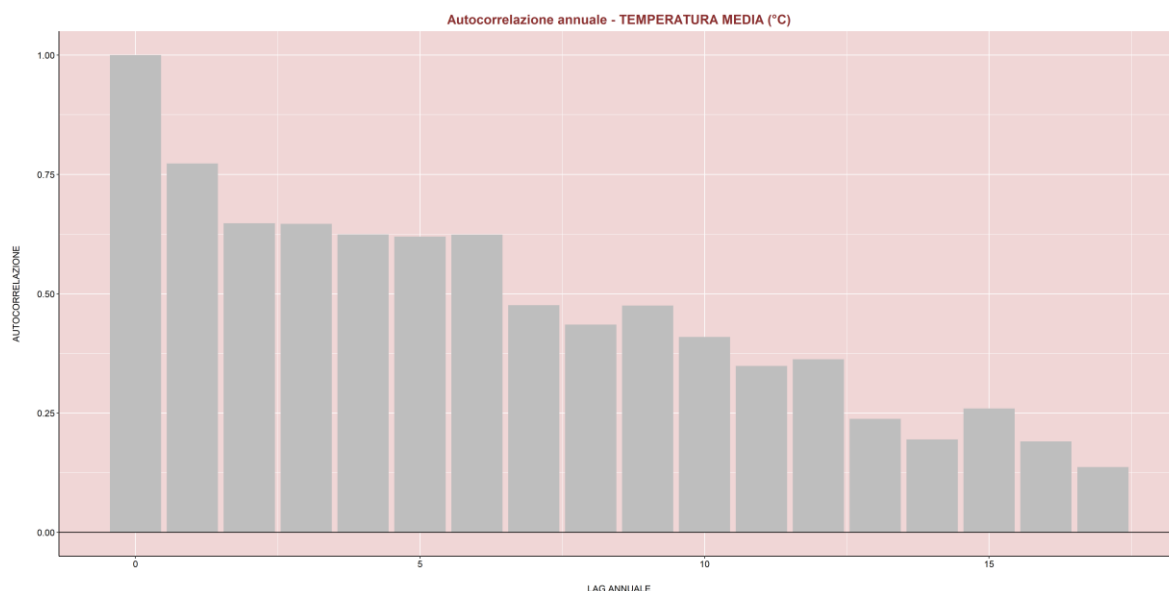


Figura 42. Funzione di autocorrelazione della serie delle temperature medie aggregate annualmente

Dall'osservazione dei risultati ottenuti dall'analisi delle serie giornaliere del capoluogo laziale si nota, a un primo sguardo, come le oscillazioni stagionali dominino l'andamento del grafico, rendendo difficile la lettura di una tendenza chiara negli anni.

Per questo motivo viene introdotta l'analisi dei trend lineari di tali serie che rivela un costante incremento dei parametri analizzati.

La pendenza dei grafici lineari, infatti, è pari a $0,073\text{ }^{\circ}\text{C/anno}$ (con errore standard di $0,003$) per le temperature massime, $0,061\text{ }^{\circ}\text{C/anno}$ (errore standard $0,003$) per le medie e $0,049\text{ }^{\circ}\text{C/anno}$ (errore standard $0,003$) per le minime. In concreto, tali valori corrispondono ad un aumento decennale di $0,73\text{ }^{\circ}\text{C}$ della temperatura massima, di $0,61\text{ }^{\circ}\text{C}$ della temperatura minima e $0,49\text{ }^{\circ}\text{C}$ della temperatura media.

Questi risultati evidenziano un riscaldamento nettamente più marcato per le temperature massime, suggerendo l'aggravarsi di fenomeni di caldo estremo nella città.

L'analisi del trend polinomiale di secondo grado mostra un comportamento non puramente lineare delle serie giornaliere. La curva descrive, infatti, un primo tratto sostanzialmente piatto, seguito da una sensibile concavità verso l'alto, che incrementa la sua pendenza dalla fine degli anni Settanta in poi. Tale andamento è riscontrabile per i tre parametri, ma visibilmente più accentuata nei grafici delle temperature massime e medie. Il grafico relativo alle temperature minime ricalca, infatti, maggiormente l'andamento del proprio trend lineare.

Lo studio delle serie aggregate su scala mensile e annuale, permette di filtrare il rumore statistico che accompagna un grande numero di osservazioni, confermando la coerenza interna dell'analisi: le pendenze lineari restano pressoché identiche a quelle registrate a livello giornaliero su tutte le scale. Le pendenze registrate per le serie mensili segnalano un aumento per decennio pari a $0,73\text{ }^{\circ}\text{C}$ per le temperature massime, $0,49\text{ }^{\circ}\text{C}$ per le minime e $0,61\text{ }^{\circ}\text{C}$ per le medie, mentre le serie annuali riportano un aumento di rispettivamente $0,73\text{ }^{\circ}\text{C}$, $0,47\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $0,60\text{ }^{\circ}\text{C}$ ogni dieci anni.

L'osservazione del trend polinomiale di grado 2 delle serie aggregate offre spunti di lettura differenti a seconda della scala temporale adottata.

Sull'aggregazione mensile, la curva polinomiale funge da solida traccia di fondo al di sotto della marcata sinusoide stagionale, descrivendo puntualmente un innalzamento termico continuo che si fa progressivamente più ripido a partire dalla fine degli anni Settanta e che presenta un ulteriore incremento della velocità negli ultimi due decenni. Come per la scala giornaliera, anche in questo caso, l'andamento descritto è più marcato per le temperature massime e medie, mentre le temperature minime aumentano con maggior linearità.

Sull'aggregazione annuale, invece, l'assenza del ciclo stagionale permette ai mutamenti strutturali di emergere con la massima nitidezza, svelando una struttura "a gradino" della serie.

La serie annuale delle temperature massime, infatti, mostra valori sostanzialmente stazionari intorno ai $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ fino alla fine degli anni '70, per poi subire un brusco salto verso l'alto attorno al 1980, inaugurando una fase di crescita più graduale, ma inesorabile. Un comportamento analogo, seppur meno netto, si osserva per le temperature minime e medie, entrambe caratterizzate da un cambio di regime tra la fine degli anni '70 e l'inizio degli anni '80.

Mentre alla scala mensile la parabola asseconda dolcemente l'evoluzione di fondo, alla scala annuale il trend polinomiale finisce inevitabilmente per appiattire l'andamento della serie, distribuendo l'impatto visivo del salto termico in una curva liscia di accelerazione costante.

L'analisi dell'autocorrelazione completa e arricchisce il quadro statistico e fisico. A scala mensile, i correlogrammi mostrano la tipica e perfetta struttura periodica sinusoidale, con picchi positivi a multipli di 12 lag e valori negativi a 6 lag, espressione diretta della stagionalità mediterranea.

A scala annuale, l'autocorrelazione decade in modo simile per tutti e tre i parametri di temperatura, scendendo sotto la soglia di 0,5 già a partire dall'ottavo-nono lag, pur mantenendosi su valori positivi fino a 18 anni di distanza.

Roma Macao	Pendenze	Pendenze	Pendenze
	Temperature massime [°C/anno $\pm$ errore standard]	Temperature minime [°C/anno $\pm$ errore standard]	Temperature medie [°C/anno $\pm$ errore standard]
Serie giornaliera	0,07 $\pm$ 0,003	0,05 $\pm$ 0,003	0,06 $\pm$ 0,003
Serie mensili	0,07 $\pm$ 0,02	0,05 $\pm$ 0,01	0,06 $\pm$ 0,01
Serie annuali	0,07 $\pm$ 0,006	0,05 $\pm$ 0,005	0,06 $\pm$ 0,005

Tabella 4. Tabella riassuntiva delle pendenze dei trend lineari ottenute per la stazione di Roma Macao

Milano – Milano Brera

Per la città di Milano è stato possibile ricavare delle serie temporali giornaliere molto più lunghe rispetto alle città di Roma, Napoli e Palermo. Per la stazione di Milano Brera, infatti, sono disponibili delle serie ultracentenarie che permettono di ricostruire i trend climatici della città a partire dal 1763. Nel 2021 la stazione è stata insignita del titolo “Osservatorio Centenario” dalla World Meteorological Organization (WMO, in italiano OMM - Organizzazione Meteorologica Mondiale), riconoscimento riservato ai siti che, nel mondo, effettuano misure meteorologiche in modo regolare e continuativo da almeno cento anni.

Temperature massime - Serie giornaliera e trend

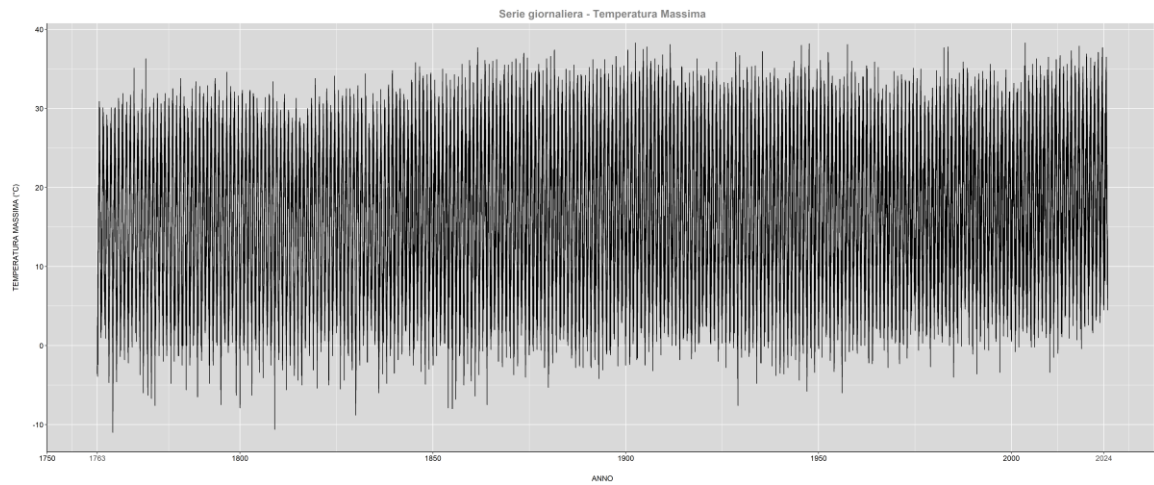


Figura 43. Serie temporale della temperatura massima giornaliera nel periodo analizzato (1763-2024) registrata presso la stazione di Milano Brera

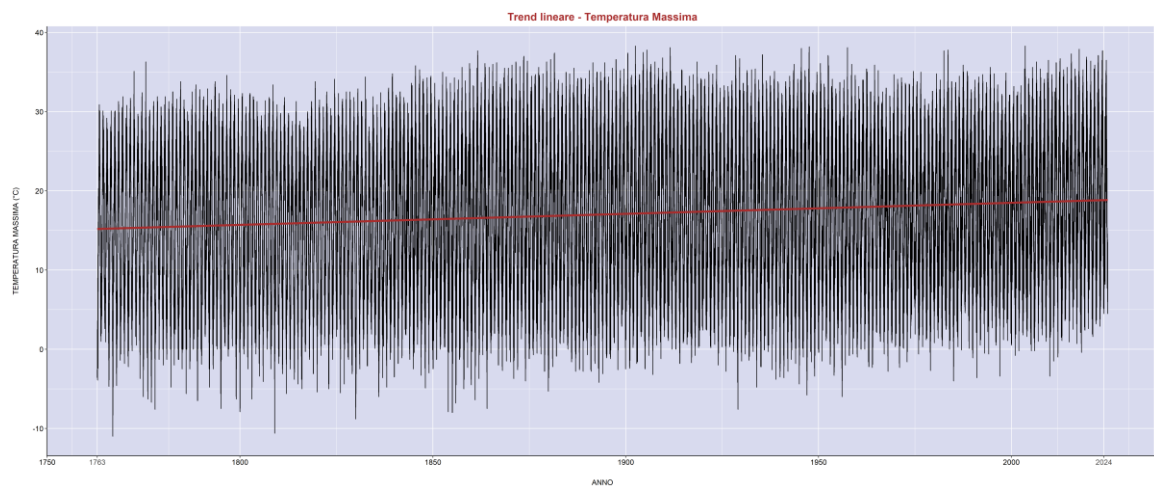


Figura 44. Trend lineare della serie delle temperature massime giornaliere
(Pendenza del trend = $0,01 \text{ }^{\circ}\text{C/anno}$ Errore standard = $0,0004$)

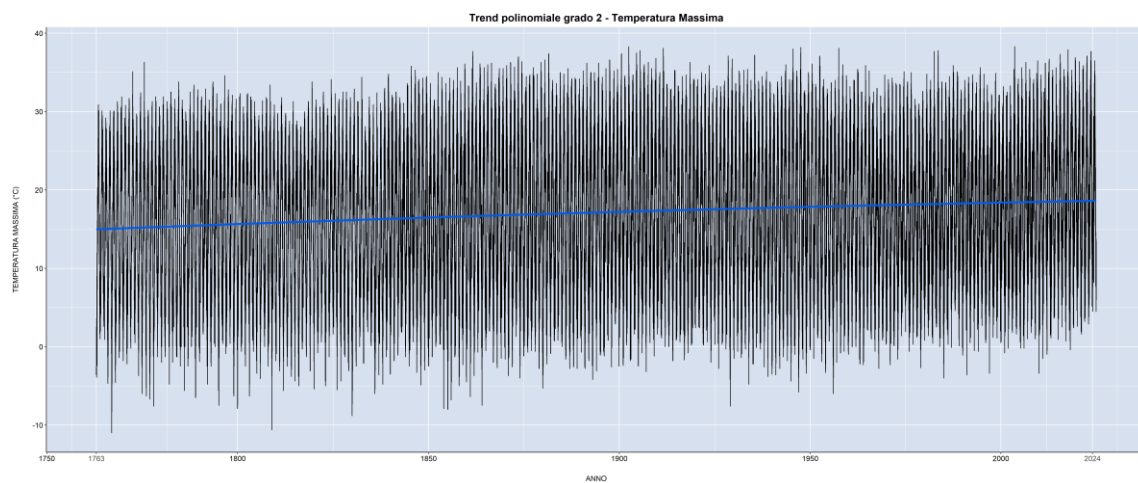


Figura 45. Trend polinomiale di secondo grado della serie delle temperature massime giornaliere

Temperature minime - Serie giornaliera e trend

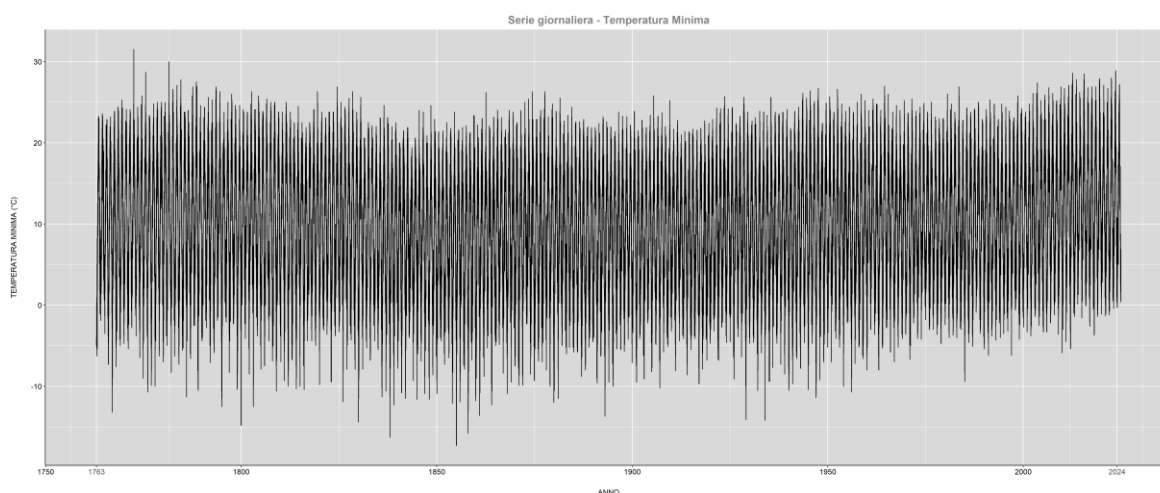


Figura 46. Serie temporale della temperatura minima giornaliera nel periodo analizzato (1763-2024) registrata presso la stazione di Milano Brera

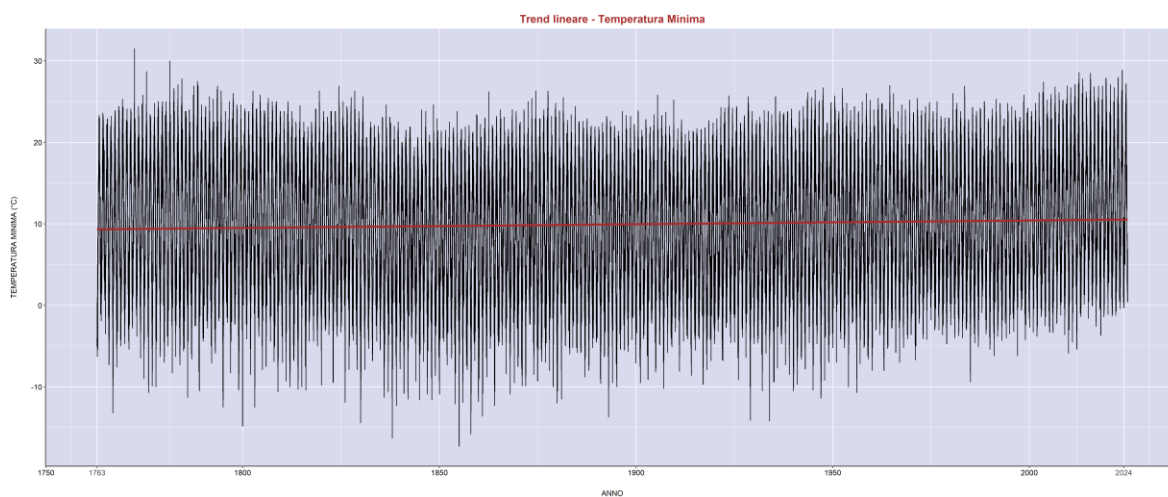


Figura 47. Trend lineare della serie delle temperature minime giornaliere
(Pendenza del trend= $0,005\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{anno}$ Errore standard = $0,0003$)

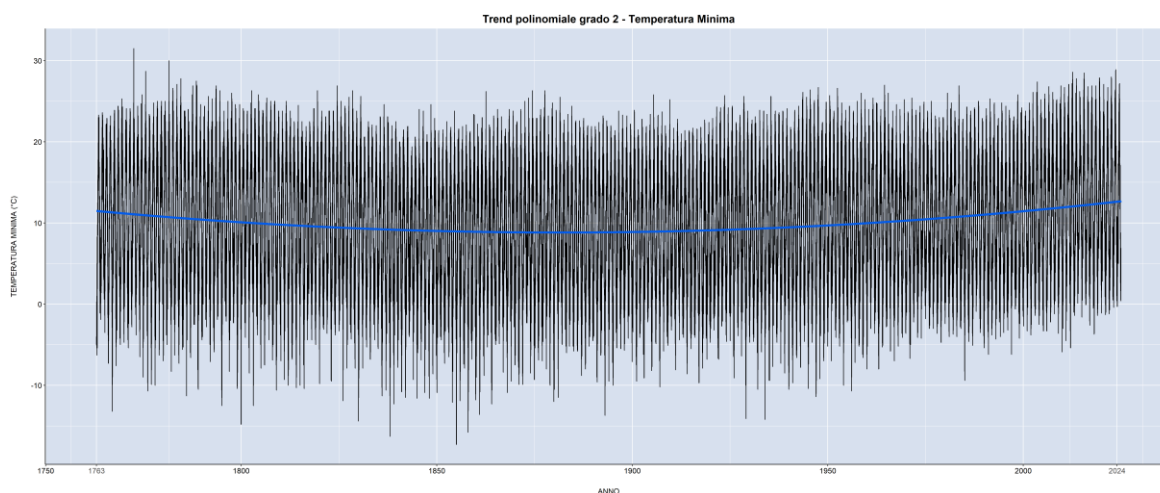


Figura 48. Trend polinomiale di secondo grado della serie delle temperature minime giornaliere

Temperature medie - Serie giornaliera e trend

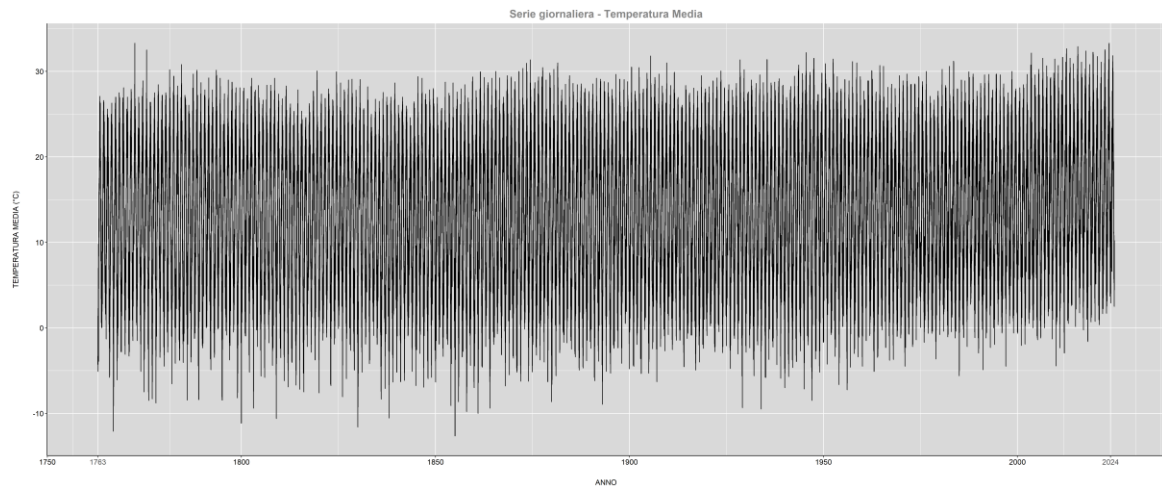


Figura 49. Serie temporale della temperatura media giornaliera nel periodo analizzato (1763-2024) registrata presso la stazione di Milano Brera

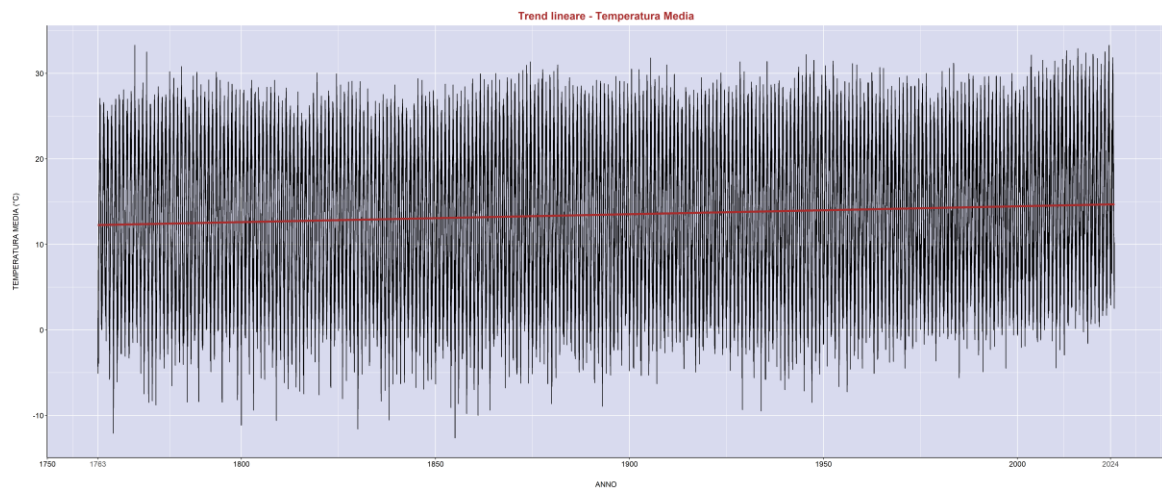


Figura 50. Trend lineare della serie delle temperature medie giornaliere
(Pendenza del trend = $0,009\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{anno}$ Errore standard = $0,0004$)

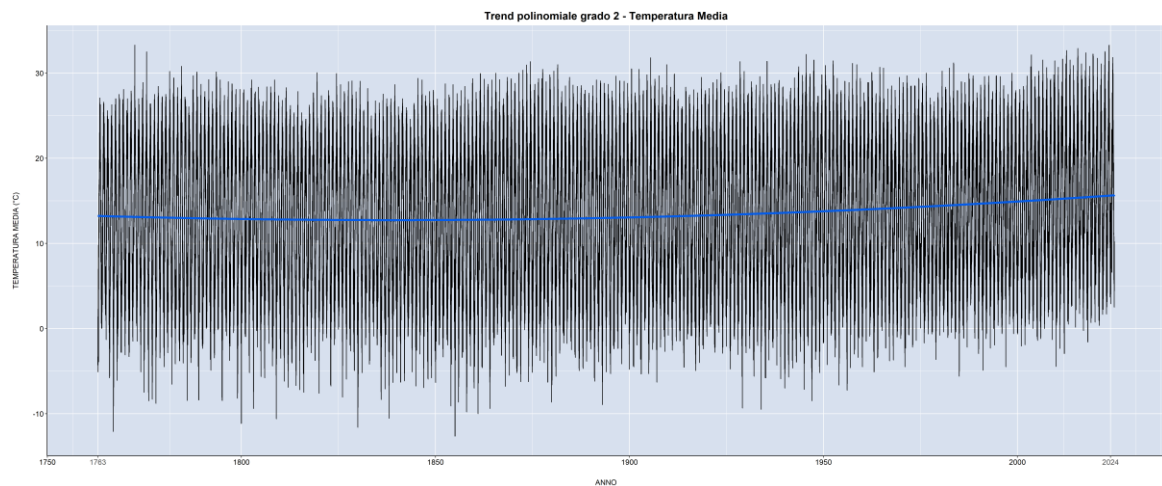


Figura 51. Trend polinomiale di secondo grado della serie delle temperature medie giornaliere

Temperature massime - Serie mensile e trend

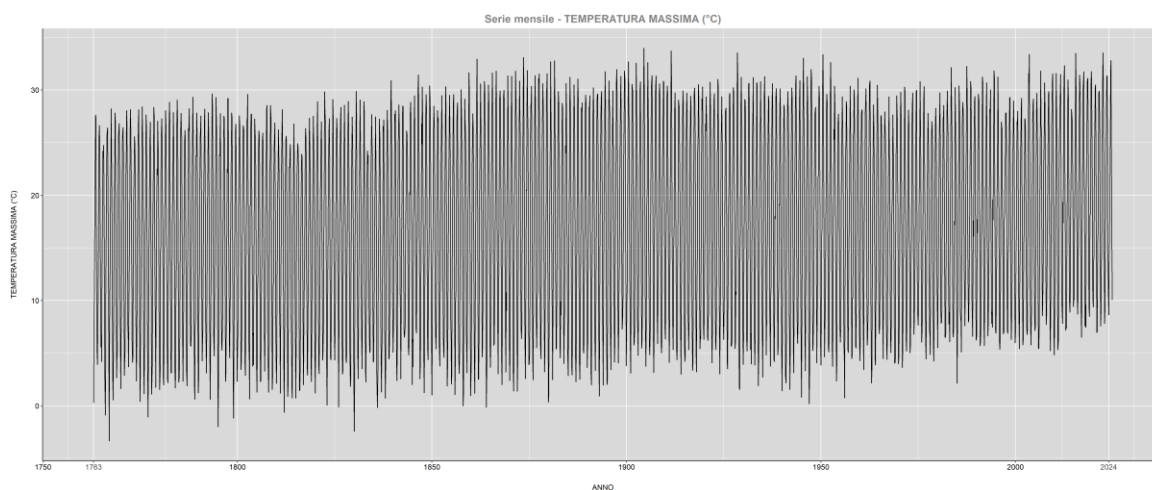


Figura 52. Serie temporale delle temperature massime aggregate mensilmente nel periodo analizzato (1763-2024) registrata presso la stazione di Milano Brera

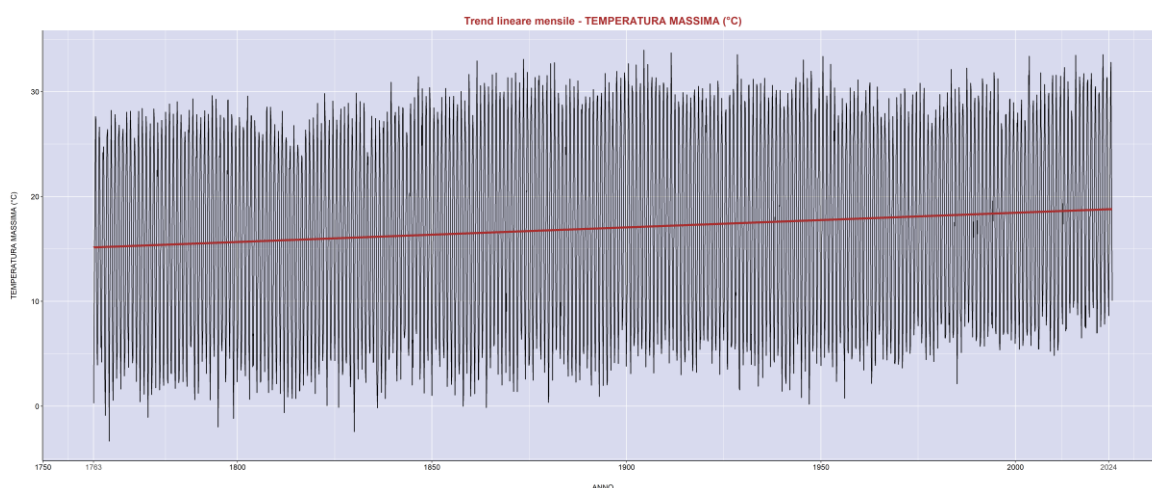


Figura 53. Trend lineare della serie delle temperature massime aggregate mensilmente
(Pendenza del trend = $0,01\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{anno}$ Errore standard = $0,002$)

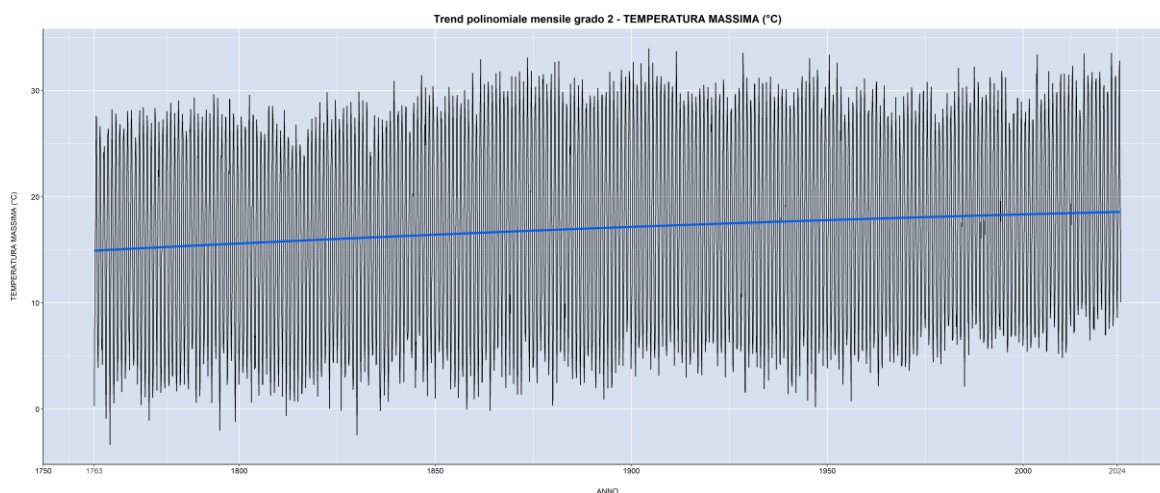


Figura 54. Trend polinomiale di secondo grado della serie delle temperature massime aggregate mensilmente

Temperature minime - Serie mensile e trend

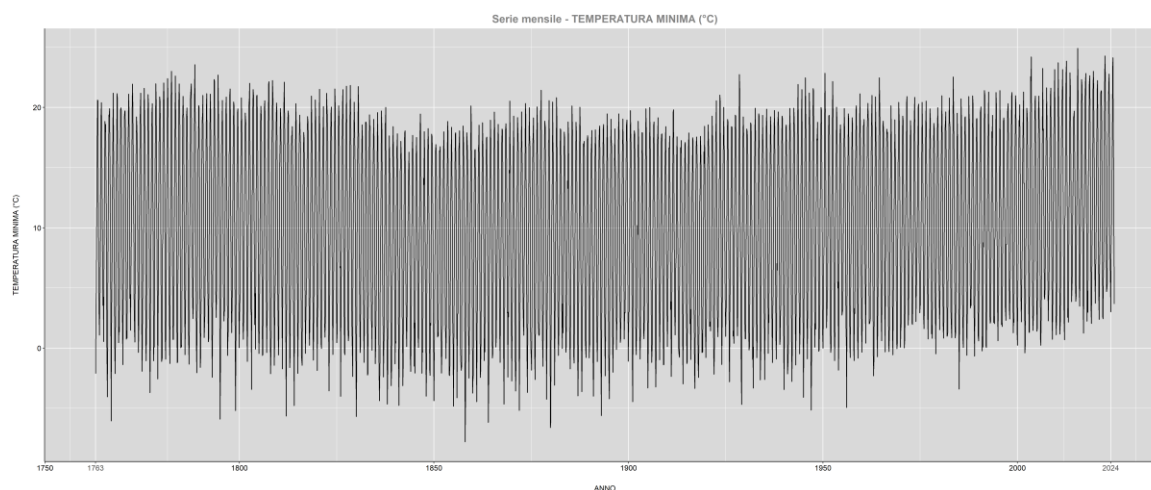


Figura 55. Serie temporale delle temperature minime aggregate mensilmente nel periodo analizzato (1763-2024) registrata presso la stazione di Milano Brera

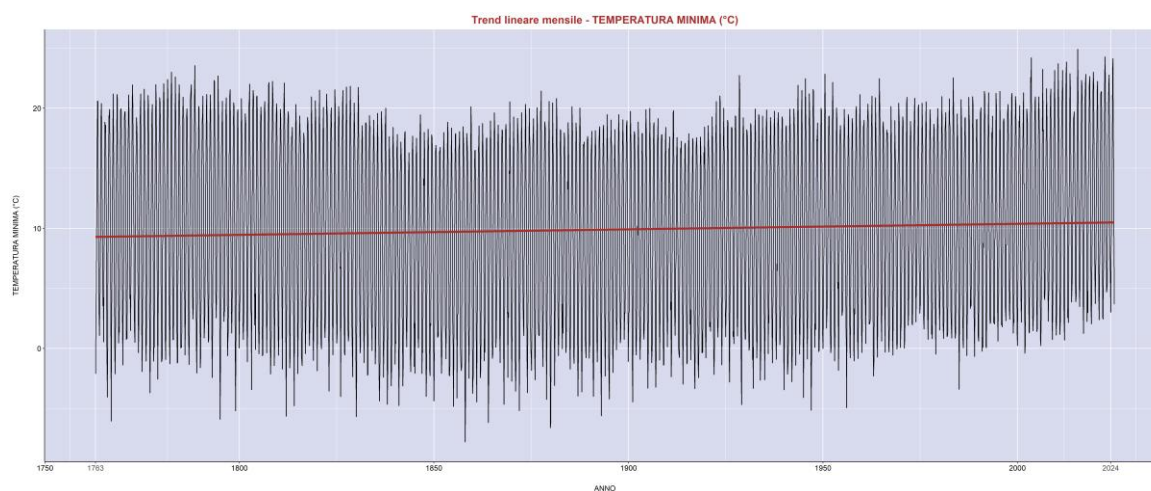


Figura 56. Trend lineare della serie delle temperature minime aggregate mensilmente (Pendenza del trend = $0,005\text{ }^{\circ}\text{C/anno}$ Errore standard = $0,002$)

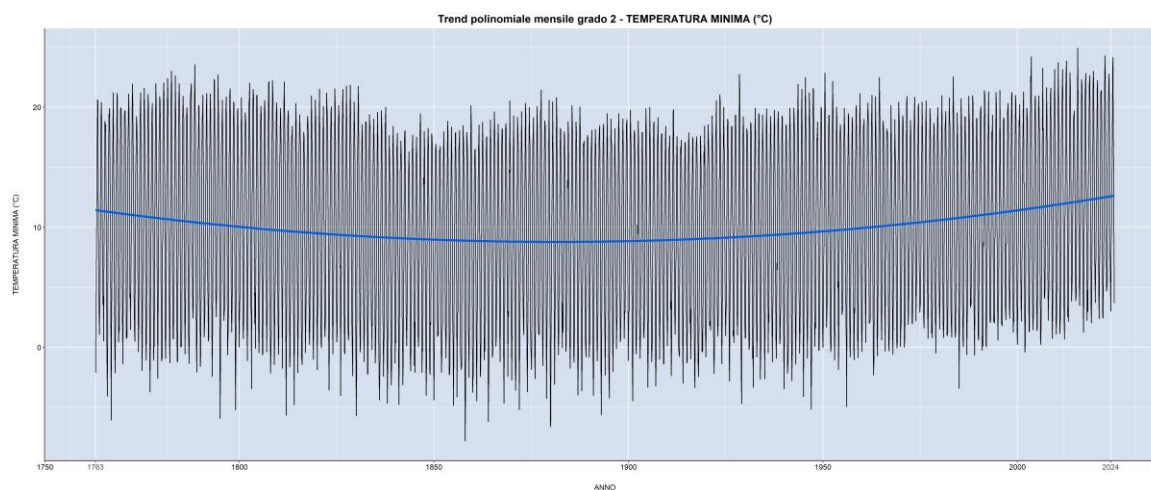


Figura 57. Trend polinomiale di secondo grado della serie delle temperature minime aggregate mensilmente

Temperature medie - Serie mensile e trend

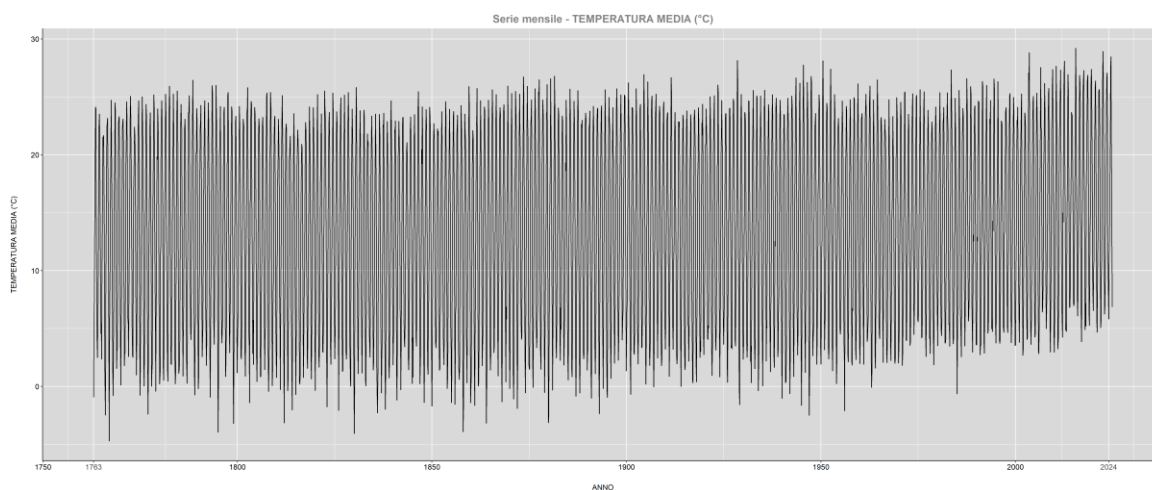


Figura 58. Serie temporale delle temperature medie aggregate mensilmente nel periodo analizzato (1763-2024) registrata presso la stazione di Milano Brera

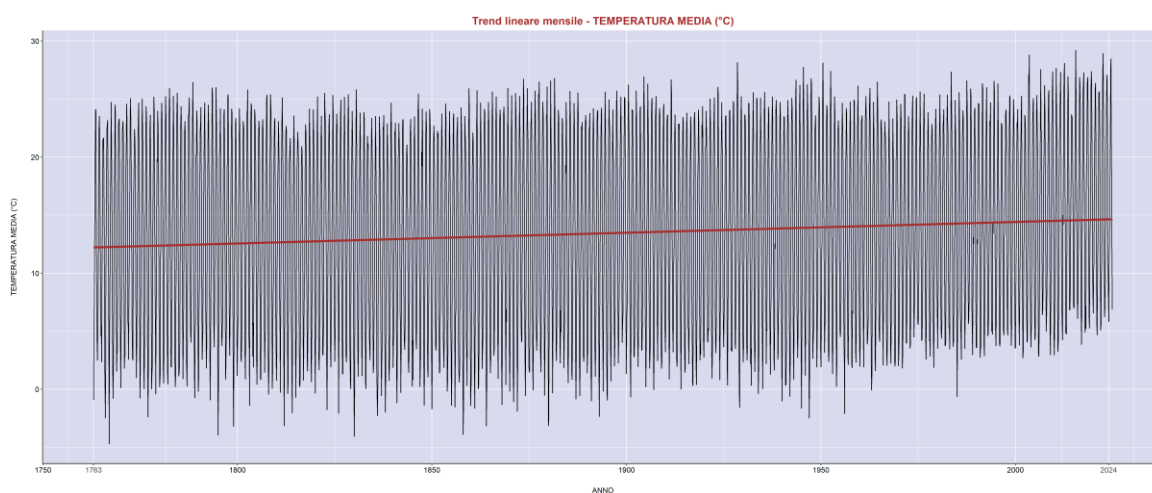


Figura 59. Trend lineare della serie delle temperature medie aggregate mensilmente
(Pendenza del trend = $0,009\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{anno}$ Errore standard = $0,002$)

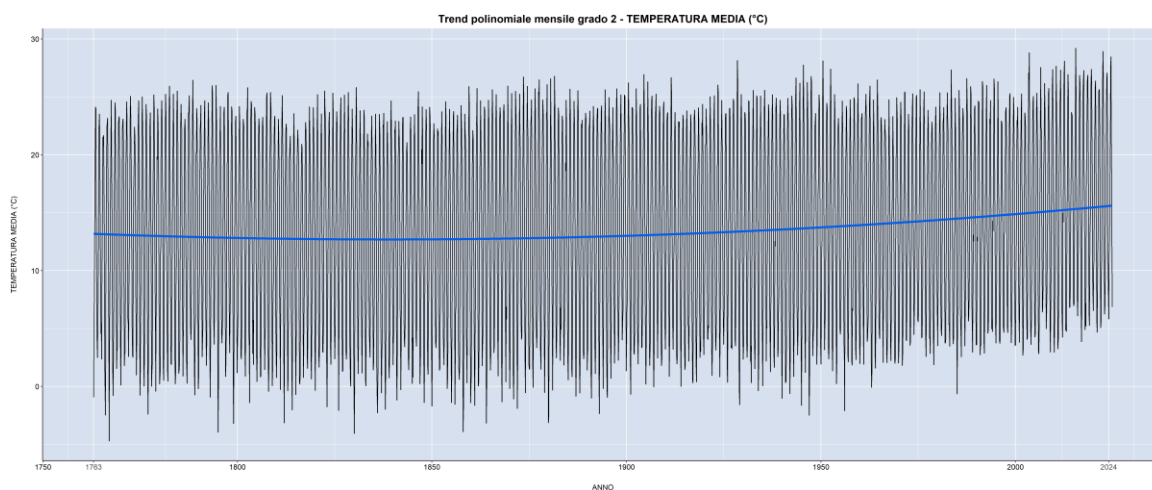


Figura 60. Trend polinomiale di secondo grado della serie delle temperature medie aggregate mensilmente

Temperature massime - Serie annuale e trend

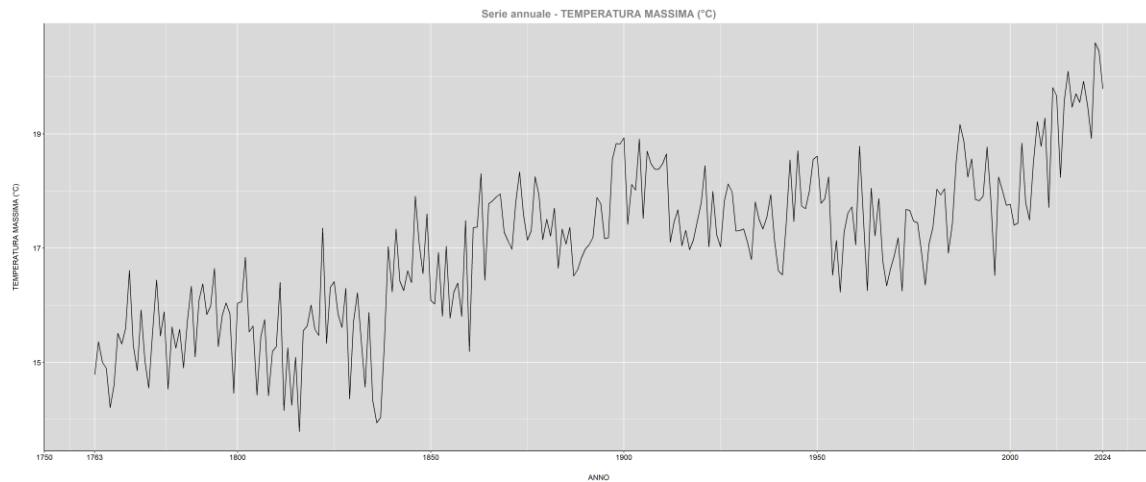


Figura 61. Serie temporale delle temperature massime aggregate annualmente nel periodo analizzato (1763-2024) registrata presso la stazione di Milano Brera

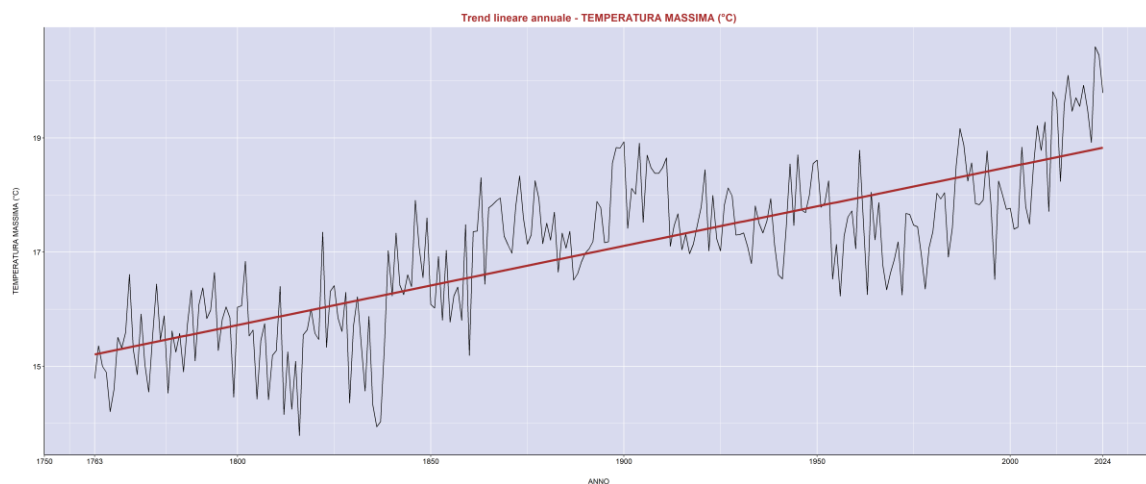


Figura 62. Trend lineare della serie delle temperature massime aggregate annualmente (Pendenza del trend = $0,01\text{ }^{\circ}\text{C/anno}$ Errore standard = $0,0007$)

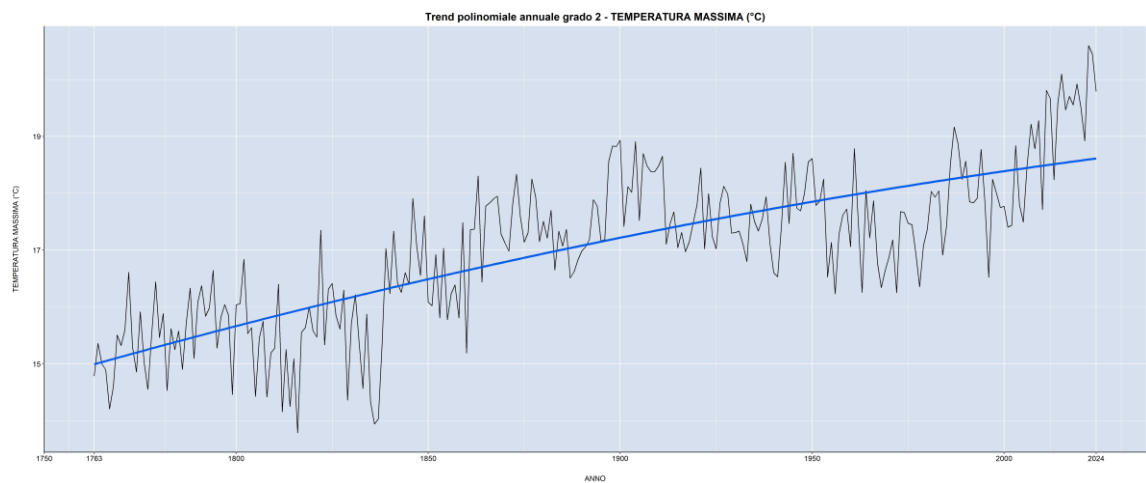


Figura 63. Trend polinomiale di secondo grado della serie delle temperature massime aggregate annualmente

Temperature minime - Serie annuale e trend

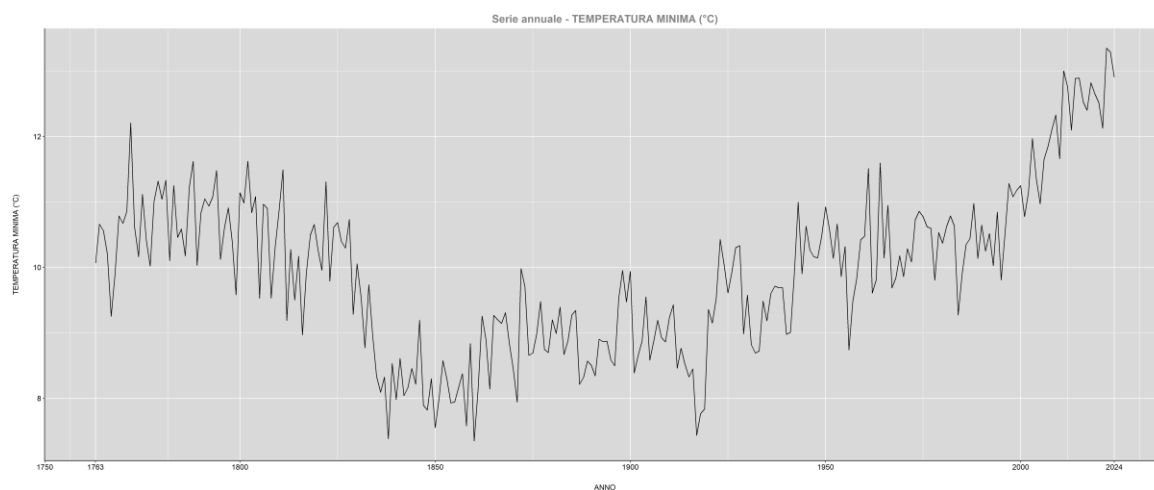


Figura 64. Serie temporale delle temperature minime aggregate annualmente nel periodo analizzato (1763-2024) registrata presso la stazione di Milano Brera

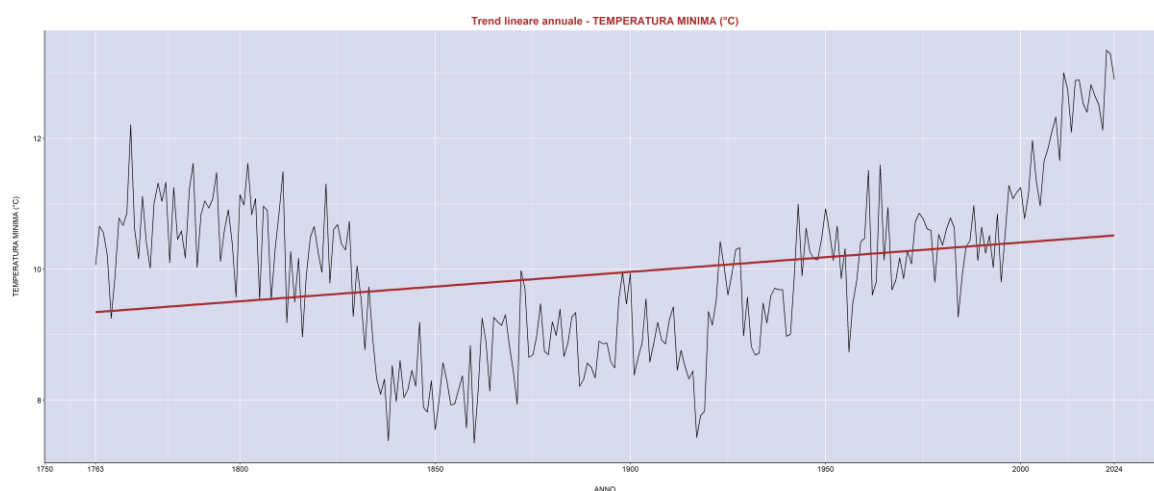


Figura 65. Trend lineare della serie delle temperature minime aggregate annualmente
(Pendenza del trend = $0,005 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{anno}$ Errore standard = $0,001$)

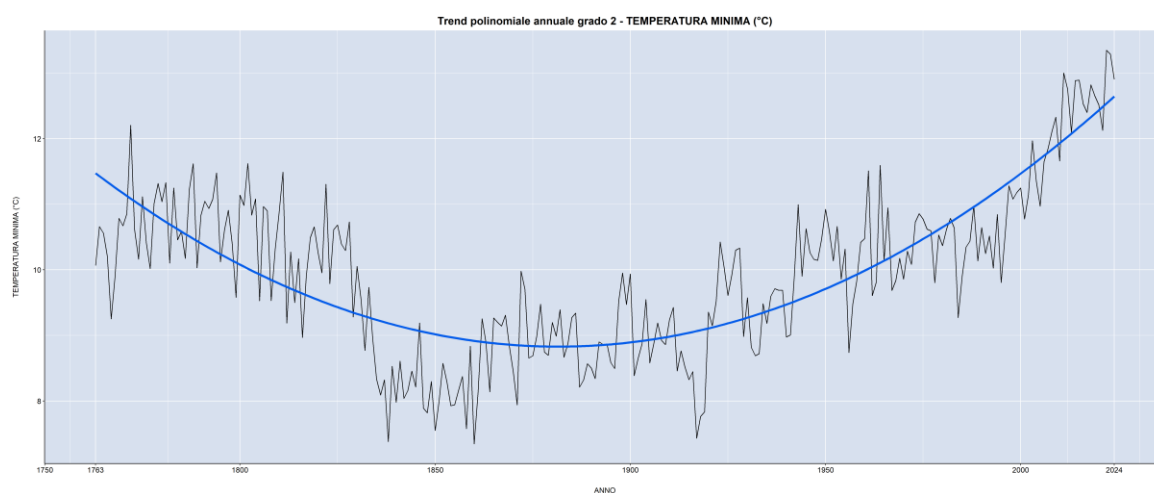


Figura 66. Trend polinomiale di secondo grado della serie delle temperature minime aggregate annualmente

Temperature medie - Serie annuale e trend

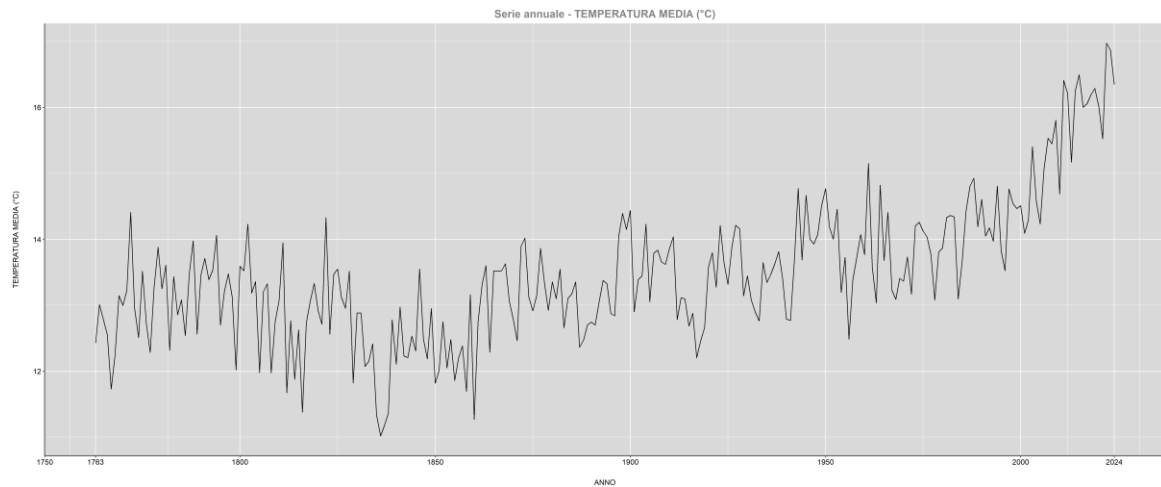


Figura 67. Serie temporale delle temperature medie aggregate annualmente nel periodo analizzato (1763-2024) registrata presso la stazione di Milano Brera

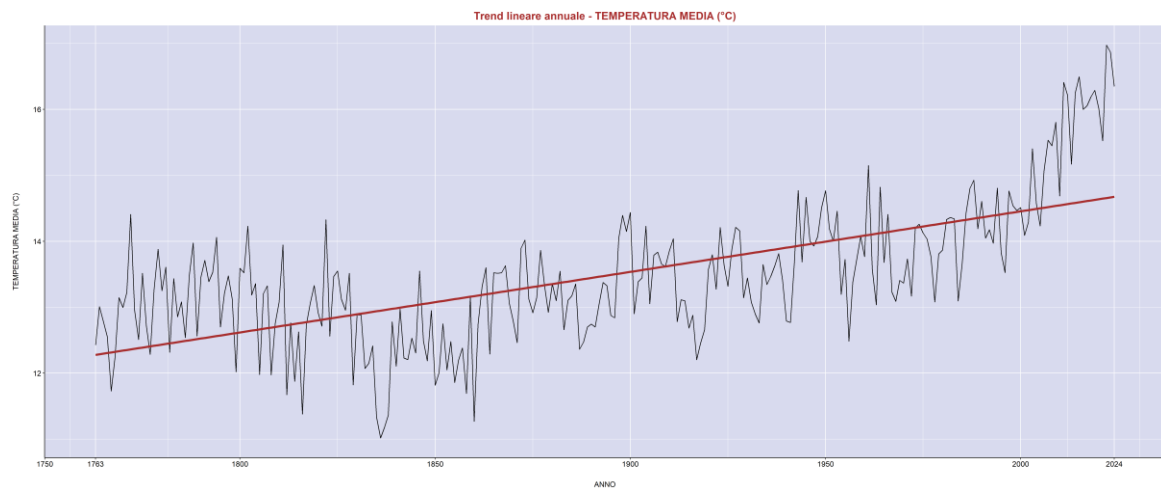


Figura 68. Trend lineare della serie delle temperature medie aggregate annualmente
(Pendenza del trend = $0,009\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{anno}$ Errore standard = $0,0007$)

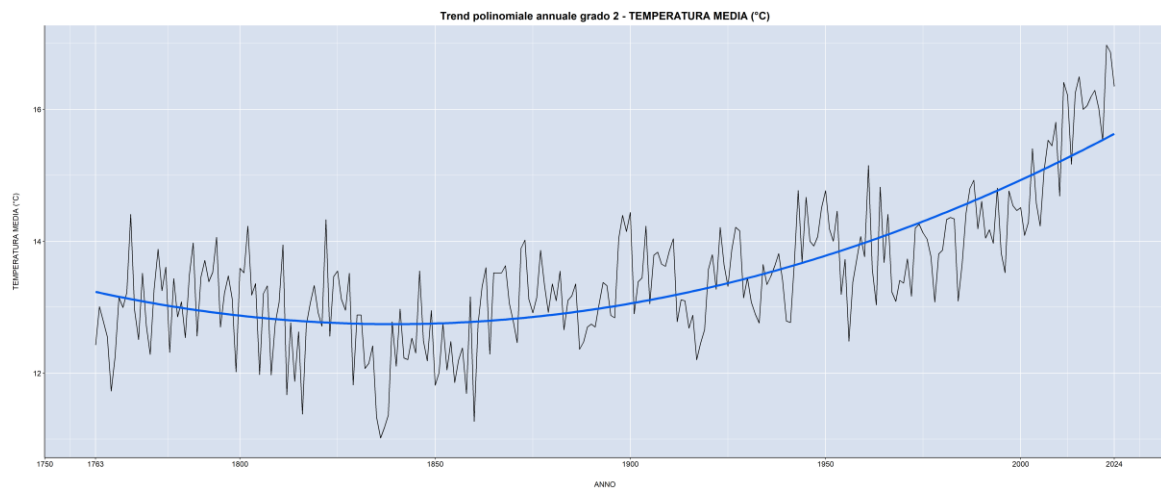


Figura 69. Trend polinomiale di secondo grado della serie delle temperature medie aggregate annualmente

Temperature massime, minime e medie - Autocorrelazione mensile

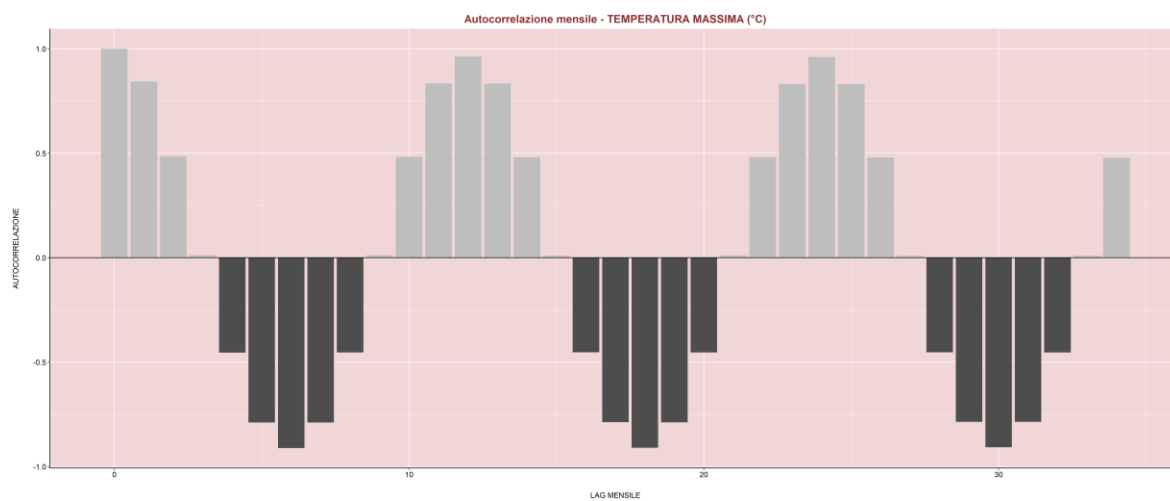


Figura 70. Funzione di autocorrelazione della serie delle temperature massime aggregate mensilmente

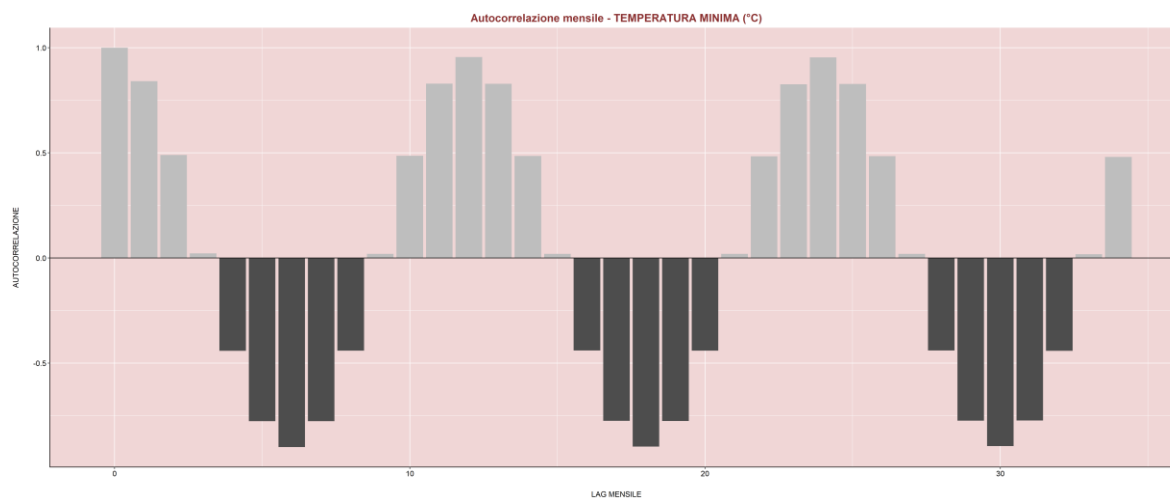


Figura 71. Funzione di autocorrelazione della serie delle temperature minime aggregate mensilmente

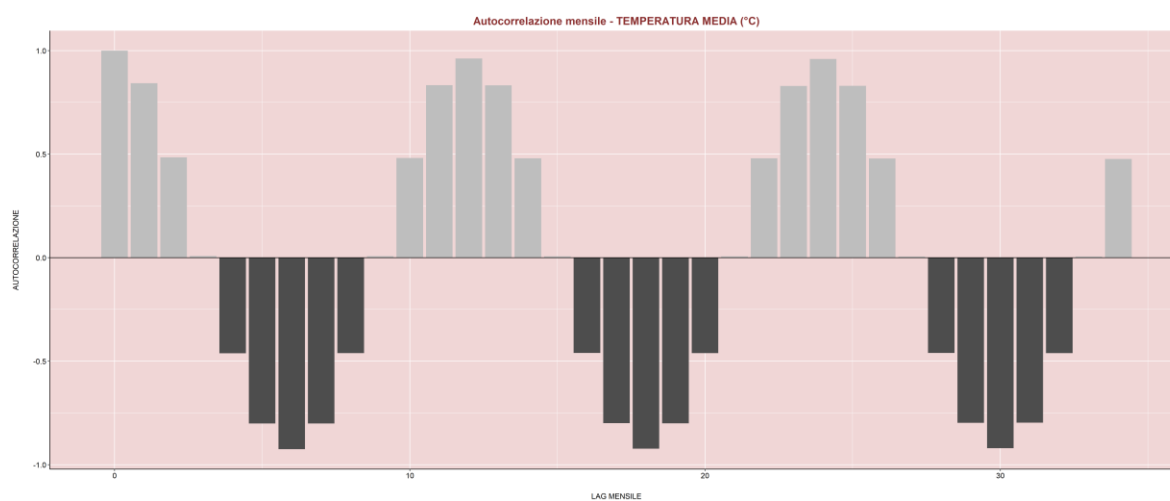


Figura 72. Funzione di autocorrelazione della serie delle temperature medie aggregate mensilmente

Temperature massime, minime e medie - Autocorrelazione annuale

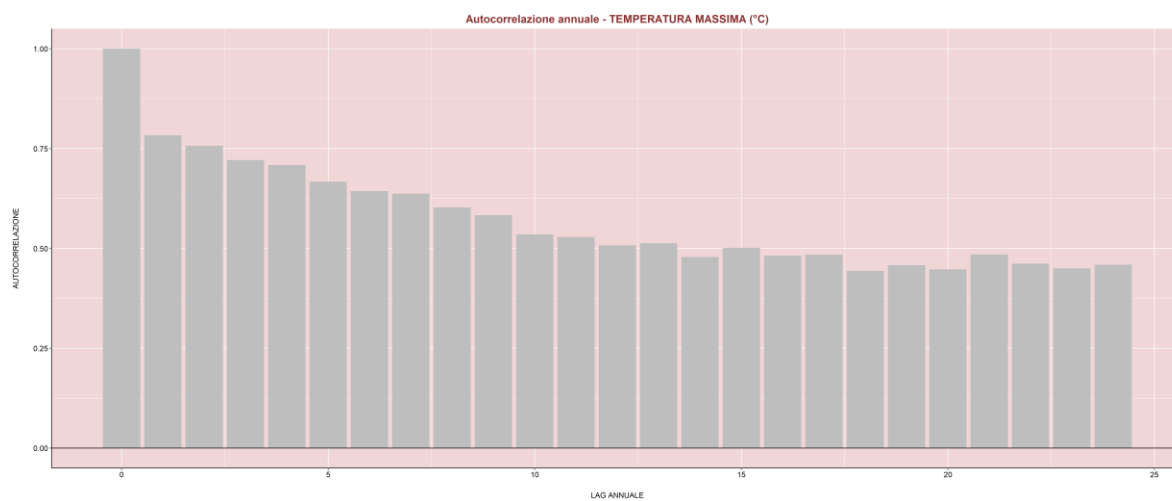


Figura 73. Funzione di autocorrelazione della serie delle temperature massime aggregate annualmente

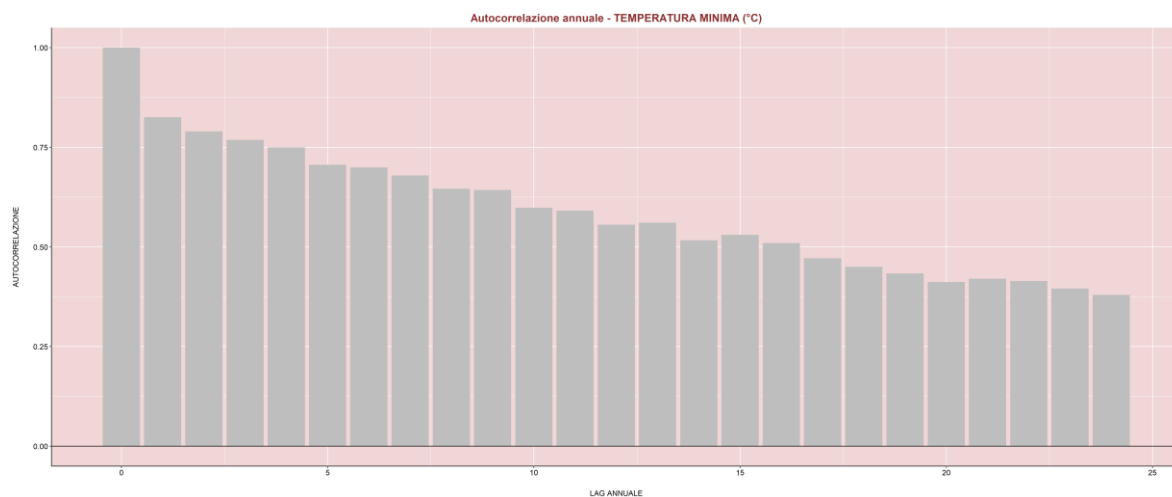


Figura 74. Funzione di autocorrelazione della serie delle temperature minime aggregate annualmente

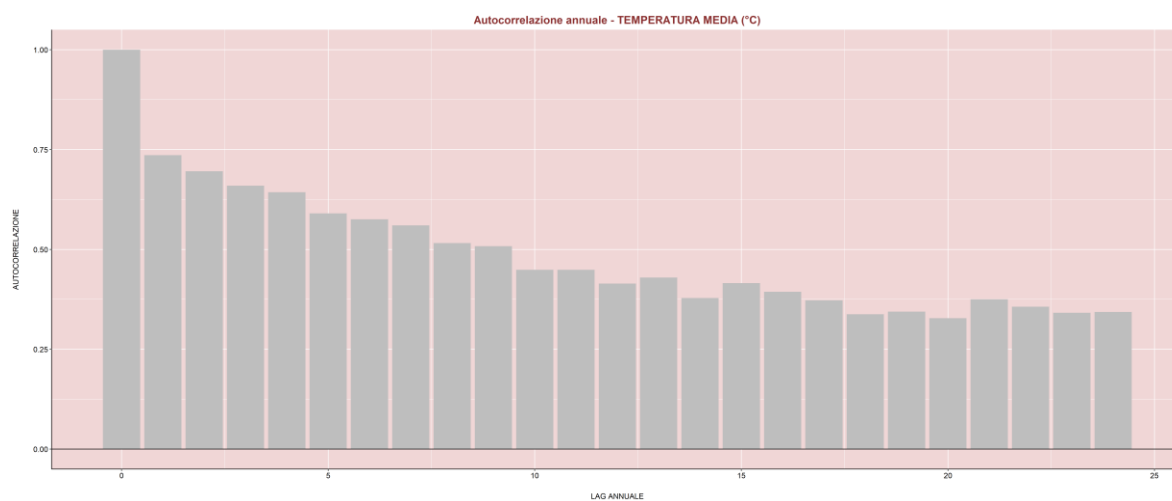


Figura 75. Funzione di autocorrelazione della serie delle temperature medie aggregate annualmente

Anche per la città di Milano, l'esame delle serie temporali giornaliere, sebbene fisiologicamente dominato dall'alta frequenza delle oscillazioni stagionali, permette di estrapolare una chiara traiettoria climatica di fondo tramite il calcolo del trend lineare.

Nello specifico, si rileva un incremento termico caratterizzato da una pendenza di 0,014 °C/anno (con errore standard di 0,0004) per le temperature massime, 0,0046 °C/anno (errore standard 0,0003) per le minime e di 0,0093 °C/anno (errore standard 0,0004) per le medie. A tali pendenze corrisponde, ogni dieci anni, un innalzamento di temperatura pari a 0,14 °C per le massime, 0,046 °C per le minime e 0,093 °C per le medie.

Analogamente a quanto osservato per la città di Roma, ma in misura ancora più estrema, l'innalzamento risulta fortemente asimmetrico: a Milano le massime crescono a un ritmo pari al triplo rispetto alle minime.

Sovrapponendo ai dati giornalieri un trend polinomiale di grado 2, per tutte e tre le variabili analizzate la curva si discosta dalla pura linearità.

Per le temperature minime e medie, il trend delinea una parabola che tocca il suo vertice inferiore intorno alla metà dell'Ottocento, per poi iniziare a risalire, evidenziando le prime tracce di un'accelerazione storica; tale comportamento è più visibile nel trend delle minime rispetto alle seconde. La curva che descrive il trend polinomiale delle temperature massime, invece, ricalca principalmente l'andamento del trend lineare, registrando un riscaldamento costante nel tempo.

Procedendo con l'aggregazione su scala mensile e annuale, il segnale conferma la solidità del riscaldamento in atto: le pendenze lineari si mantengono rigorosamente coerenti su tutte le scale temporali, registrando a livello annuale un riscaldamento pari a 0,014 °C/anno per le massime (errore standard 0,0007), 0,0045 °C/anno per le minime (errore standard 0,001) e 0,0092 °C/anno per le medie (errore standard 0,0007). Su scala mensile l'aumento registrato è di 0,014 °C/anno per le massime (errore standard 0,002), 0,0045 °C/anno per le minime (errore standard 0,002) e 0,0092 °C/anno per le medie (errore standard 0,002).

È tuttavia l'applicazione del trend polinomiale di grado 2 a fornire le chiavi di lettura storicamente più affascinanti.

Sulla serie mensile, il polinomio di ciascuno dei tre parametri analizzati, segue lo stesso andamento che aveva nelle serie giornaliere: più lineare per le temperature massime e

concavo con il vertice inferiore in corrispondenza della metà del XIX secolo per le temperature minime e medie.

Sulla serie annuale delle temperature massime, la rimozione del ciclo astronomico lascia affiorare l'evoluzione strutturale del trend: la parabola descrive un'iniziale e prolungata flessione termica che culmina in una fase di stazionarietà tra il 1850 e il 1880 – probabile espressione locale della cosiddetta "Piccola Era Glaciale" – per poi innescare un lento recupero che muta, a partire dalla seconda metà del Novecento, in una più ripida e inesorabile accelerazione.

Anche il trend polinomiale delle temperature minime mostra questo fenomeno della “Piccola Era Glaciale”: le temperature, infatti, diminuiscono rapidamente attorno al 1825, stabilizzandosi poi, per quasi una trentina d’anni, su valori inferiori rispetto a quelli registrati nel periodo precedente. Al termine di questa fase, i valori del parametro riprendono a salire fino alla fine del Novecento, quando subiscono un’ulteriore accelerazione fino ai giorni nostri.

Le temperature medie disegnano un grafico polinomiale che riassume l’andamento delle massime e delle minime, registrando anche loro un innalzamento crescente delle temperature a partire dalla fine del 1800 ed una fase ancora più ripida negli ultimi 70 anni circa.

L'analisi dei correlogrammi completa il quadro statistico e ne rafforza le deduzioni. A livello mensile si ripropone la perfetta alternanza sinusoidale, con picchi positivi a lag 12 e negativi a lag 6, indotta dalla ciclicità delle stagioni.

Spostando l'attenzione sull'autocorrelazione annuale, per i tre parametri emerge un dato di evidente inerzia termica: il decadimento dei valori positivi è estremamente graduale, mantenendosi ampiamente al di sopra dello zero fino ai 25 anni di distanza. Questa elevata persistenza statistica certifica la presenza di una correlazione significativa dei dati climatici della serie.

Milano Brera	Pendenze	Pendenze	Pendenze
	Temperature massime [°C/anno ± errore standard]	Temperature minime [°C/anno ± errore standard]	Temperature medie [°C/anno ± errore standard]
Serie giornaliere	0,01 ± 0,0004	0,005 ± 0,0003	0,009 ± 0,0004
Serie mensili	0,01 ± 0,002	0,005 ± 0,002	0,009 ± 0,002
Serie annuali	0,01 ± 0,0007	0,005 ± 0,001	0,009 ± 0,0007

Tabella 5. Tabella riassuntiva delle pendenze dei trend lineari ottenute per la stazione di Milano Brera

Napoli – Napoli Capodichino

Da una prima analisi dei dati provenienti dalla stazione di Napoli Capodichino è stata riscontrata la presenza di apprezzabili lacune nella continuità delle serie giornaliere di partenza. I dati climatici relativi agli estremi di temperatura presentano, infatti, delle discontinuità: in alcuni casi mancano i dati relativi ad interi anni, mentre, in altri, manca un numero più o meno elevato di rilevazioni giornaliere. Le lacune sono state, in primo luogo, identificate attraverso l'osservazione dei grafici delle serie giornaliere delle temperature massime e minime, dove sono chiaramente visibili le mancanze macroscopiche. Un'analisi successiva ha, invece, permesso di definire con maggiore precisione l'entità delle lacune e, più in generale, gli anni che presentano rilevazioni giornaliere mancanti.

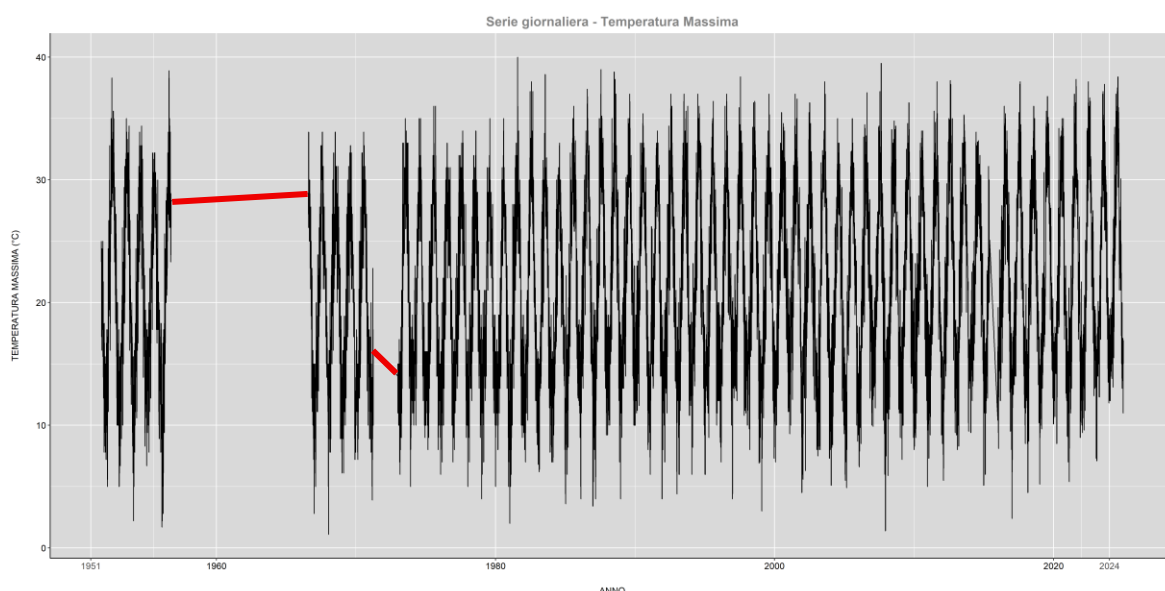


Figura 76. Serie giornaliera relativa alla temperatura massima registrata presso la stazione di Napoli Capodichino con indicate, in rosso, le discontinuità più lunghe

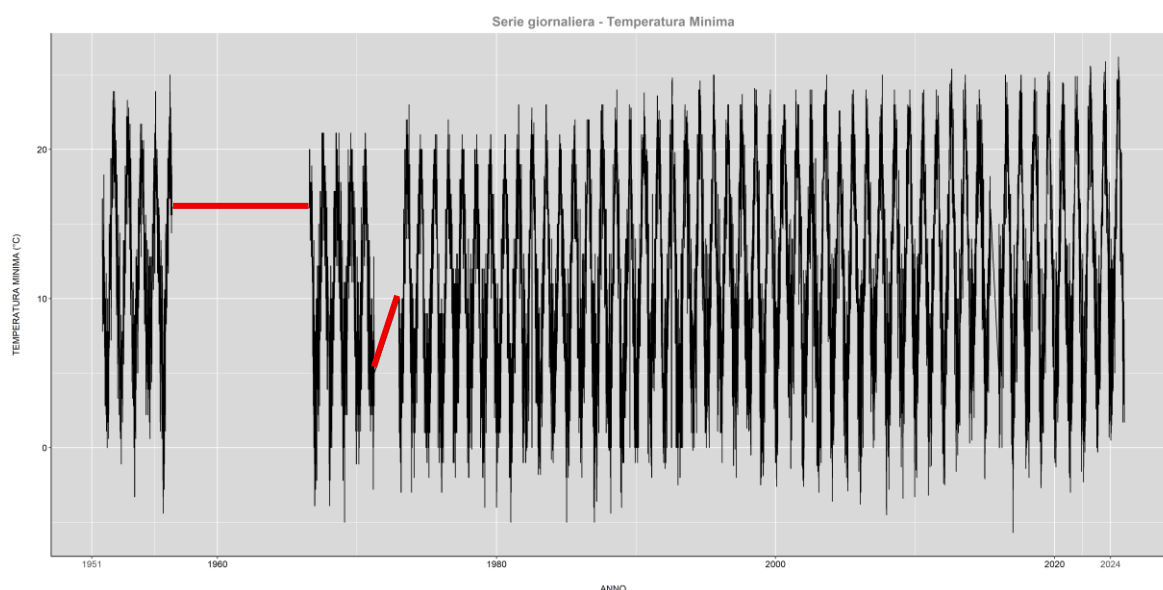


Figura 77. Serie giornaliera relativa alla temperatura minima registrata presso la stazione di Napoli Capodichino con indicate, in rosso, le discontinuità più lunghe

Per poter identificare con precisione le lacune presenti, è stata aggiunta allo script sviluppato su RStudio una funzione apposita. Questa funzione permette di ricercare e identificare il numero di giorni mancanti per ciascun anno incompleto e di riportare un elenco degli anni che sono interamente assenti nelle serie. Per le due serie (la serie giornaliera relativa alle temperature massime e quella relativa alle temperature minime) sono state riscontrate le stesse lacune, ovvero mancano le stesse giornate e gli stessi anni. Da questa analisi sono emersi i risultati riassunti di seguito.

Numero di giorni mancanti	Anno	Anno completamente assente		Anno mancante per più del 50%	
		1°	2°	1°	2°
366	1960, 1964, 1972	1°	1957	1°	1971
365	1957, 1958, 1959, 1961, 1962, 1963, 1965	2°	1958	2°	2015
276	1971	3°	1959	3°	1966
213	2015	4°	1960		
212	1966	5°	1961		
92	1956	6°	1962		
32	1967	7°	1963		
23	2013	8°	1972		

11	2024	9°	1964		
6	2018	10°	1965		
5	1952				
4	2019				
3	1955, 1979, 1999, 2021				
2	1973, 1974, 2001				
1	1953, 1969, 1970, 1975, 1976, 1977, 1980, 1994, 1996, 2000, 2003, 2016, 2017				

Tabella 6. Numero di giorni ed anni mancati nelle serie giornaliere relativa alla temperatura massima e minima registrata presso la stazione di Napoli Capodichino con indicati, in grigio, gli anni che presentano più della metà dei giorni mancanti.

Al fine di poter calcolare al meglio il trend lineare e polinomiale delle serie giornaliere e dei dati aggregati, si procede all'eliminazione delle lacune accorciando le serie. Così facendo è stato possibile escludere il maggior numero possibile di anni incompleti. Le serie storiche disponibili, che vanno dal 1951 al 2024, non corrispondono, quindi, più a quelle analizzate nei grafici che seguiranno, che vanno, invece, dal 1973 al 2024. L'unico anno fortemente incompleto che non è stato eliminato da questa risoluzione è il 2015.

Temperature massime - Serie giornaliera e trend

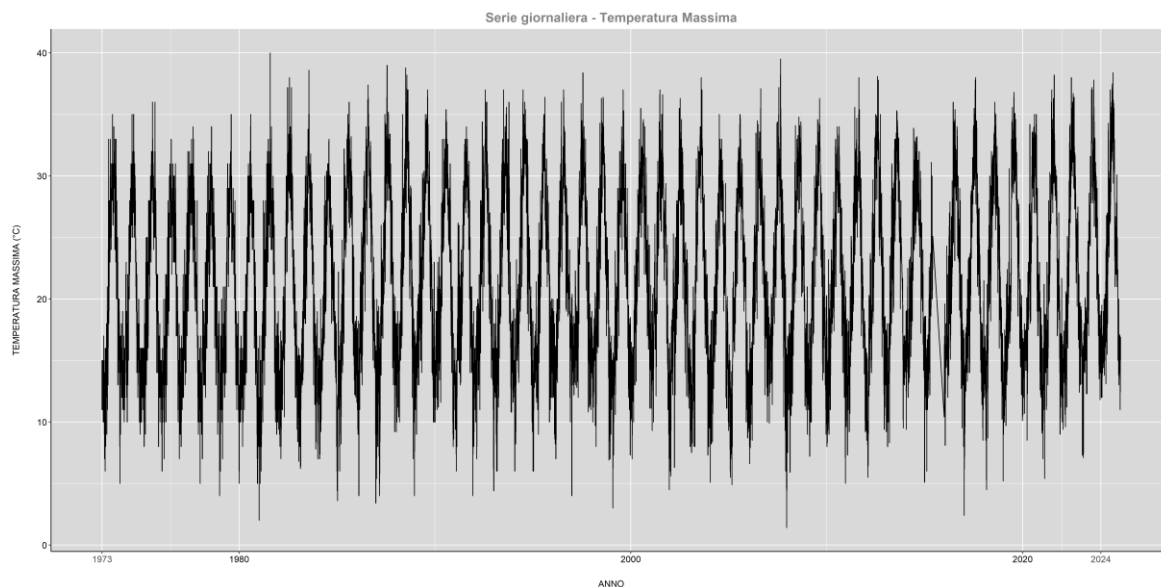


Figura 78. Serie temporale della temperatura massima giornaliera nel periodo analizzato (1973-2024) registrata presso la stazione di Napoli Capodichino

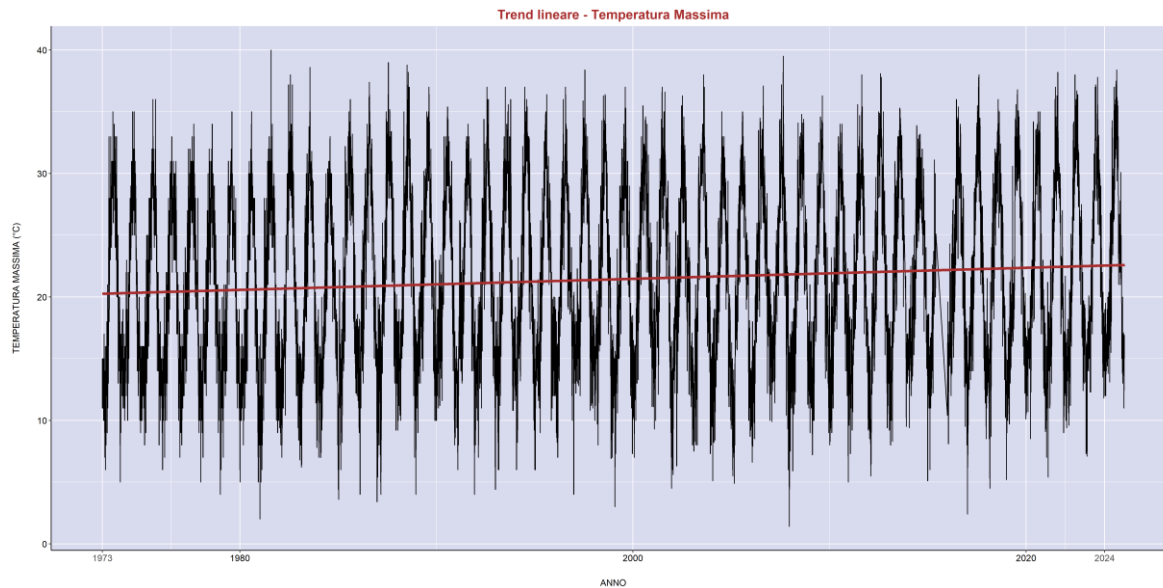


Figura 79. Trend lineare della serie delle temperature massime giornaliere
(Pendenza del trend = 0,05 °C/anno Errore standard = 0,003)

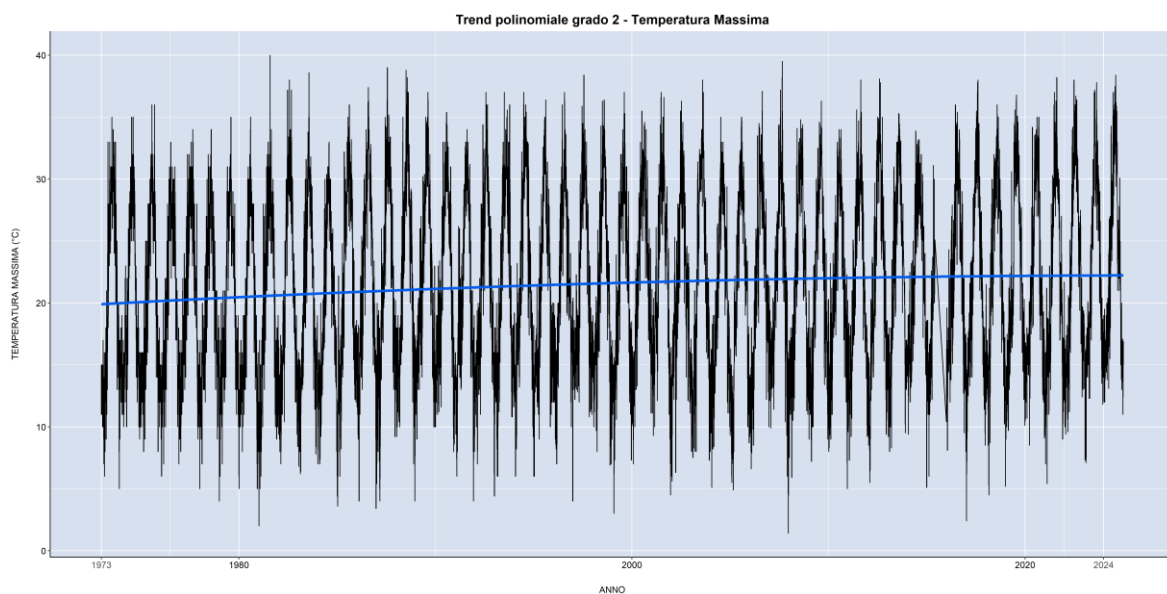


Figura 80. Trend polinomiale di secondo grado della serie delle temperature massime giornaliere

Temperature minime - Serie giornaliera e trend

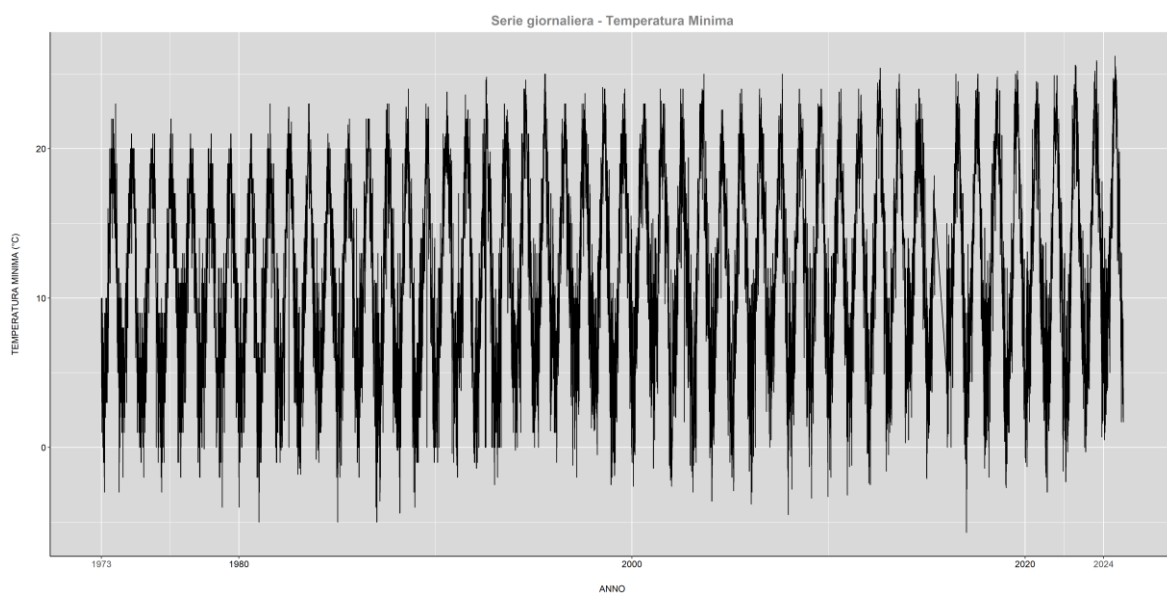


Figura 81. Serie temporale della temperatura minima giornaliera nel periodo analizzato (1973-2024) registrata presso la stazione di Napoli Capodichino

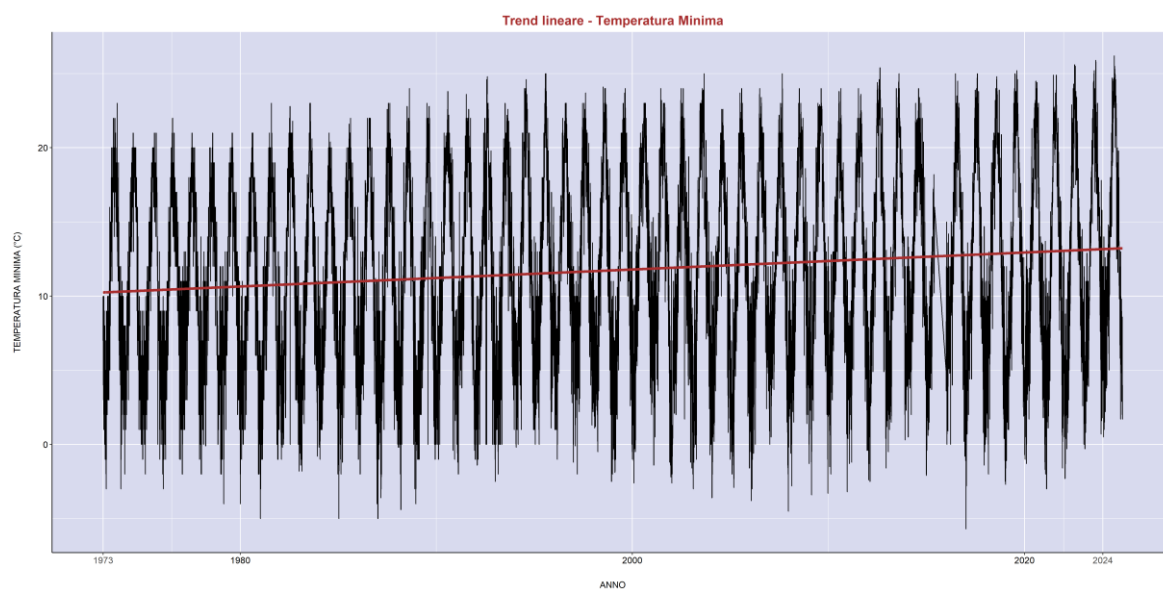


Figura 82. Trend lineare della serie delle temperature minime giornaliere
(Pendenza del trend = $0,06\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{anno}$ Errore standard = $0,003$)

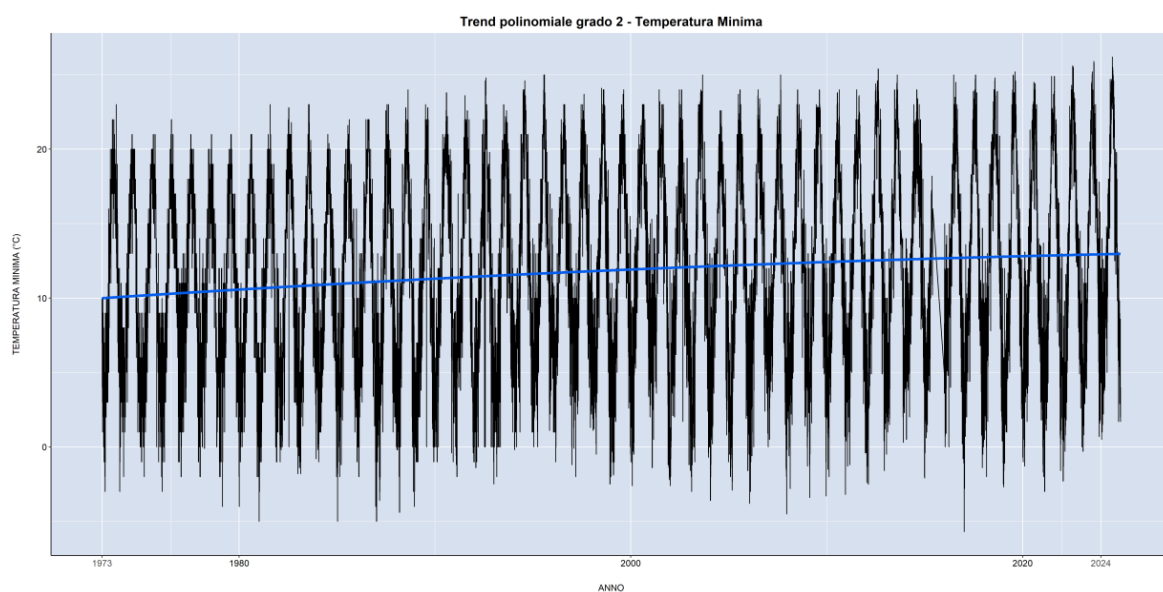


Figura 83. Trend polinomiale di secondo grado della serie delle temperature minime giornaliere

Temperature medie - Serie giornaliera e trend

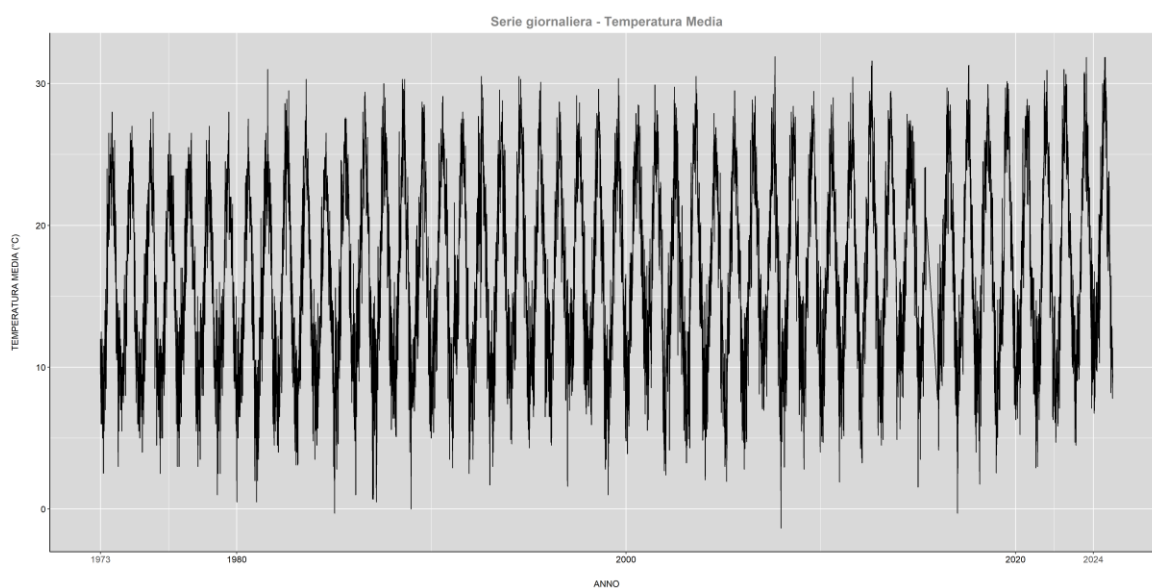


Figura 84. Serie temporale della temperatura media giornaliera nel periodo analizzato (1973-2024) registrata presso la stazione di Napoli Capodichino

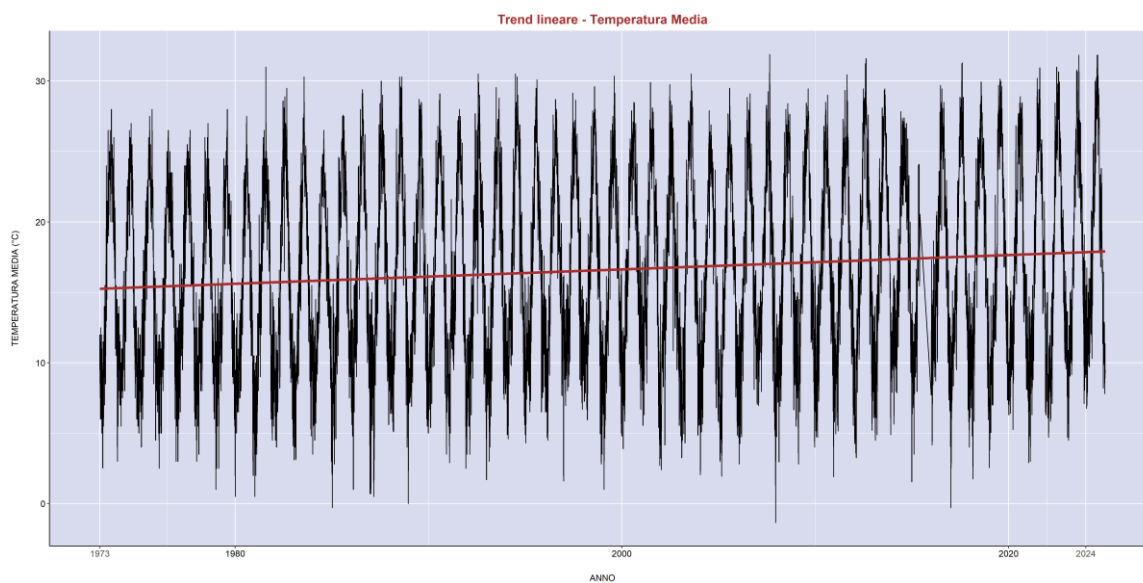


Figura 85. Trend lineare della serie delle temperature medie giornaliere
(Pendenza del trend = 0,05 °C/anno Errore standard = 0,003)

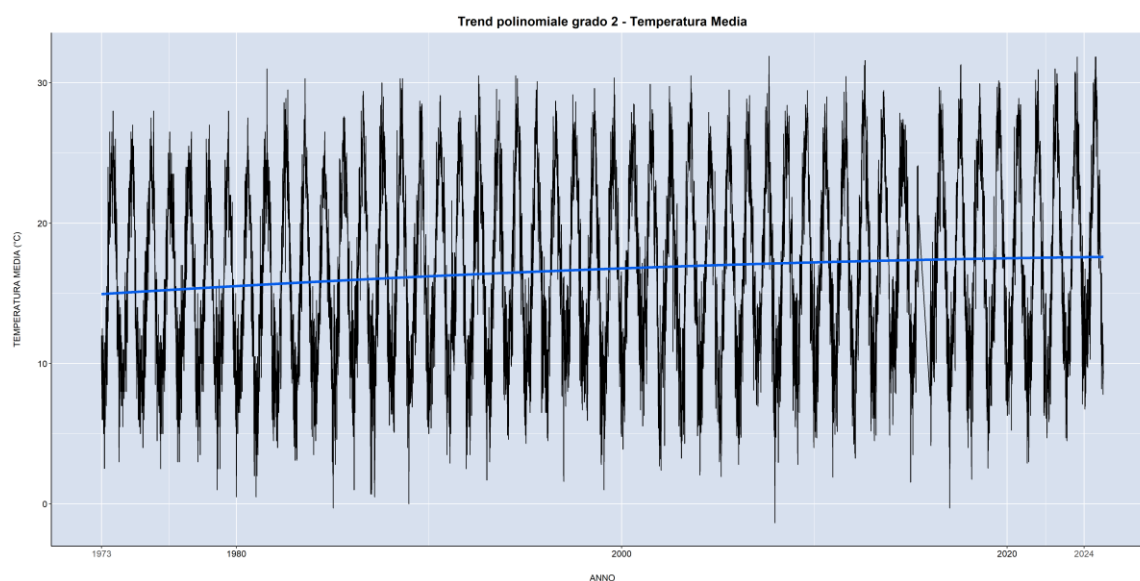


Figura 86. Trend polinomiale di secondo grado della serie delle temperature medie giornaliere

Temperature massime - Serie mensile e trend

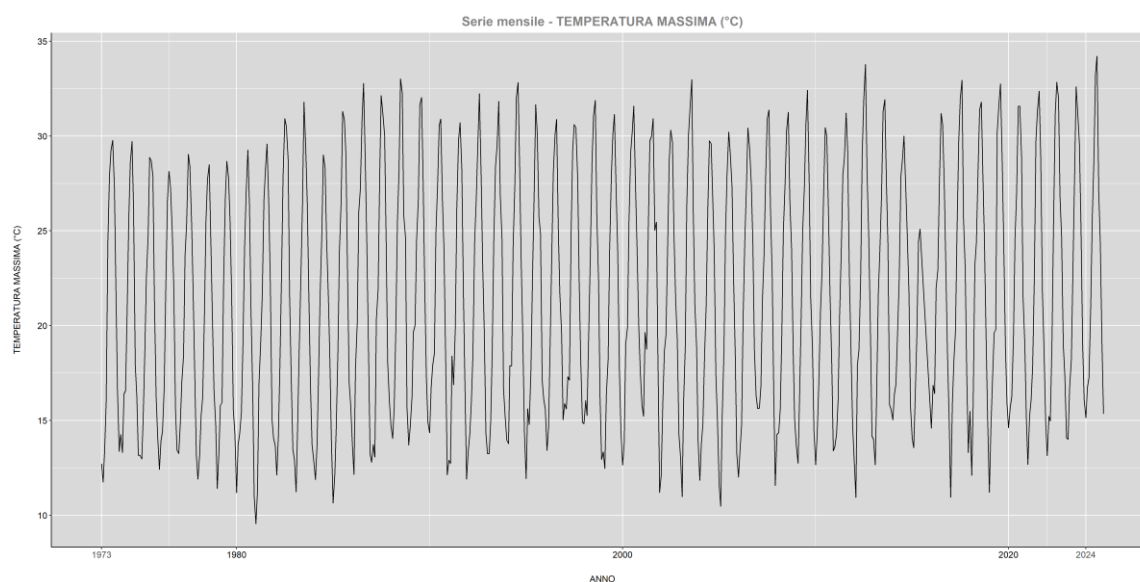


Figura 87. Serie temporale delle temperature massime aggregate mensilmente nel periodo analizzato (1973-2024) registrata presso la stazione di Napoli Capodichino

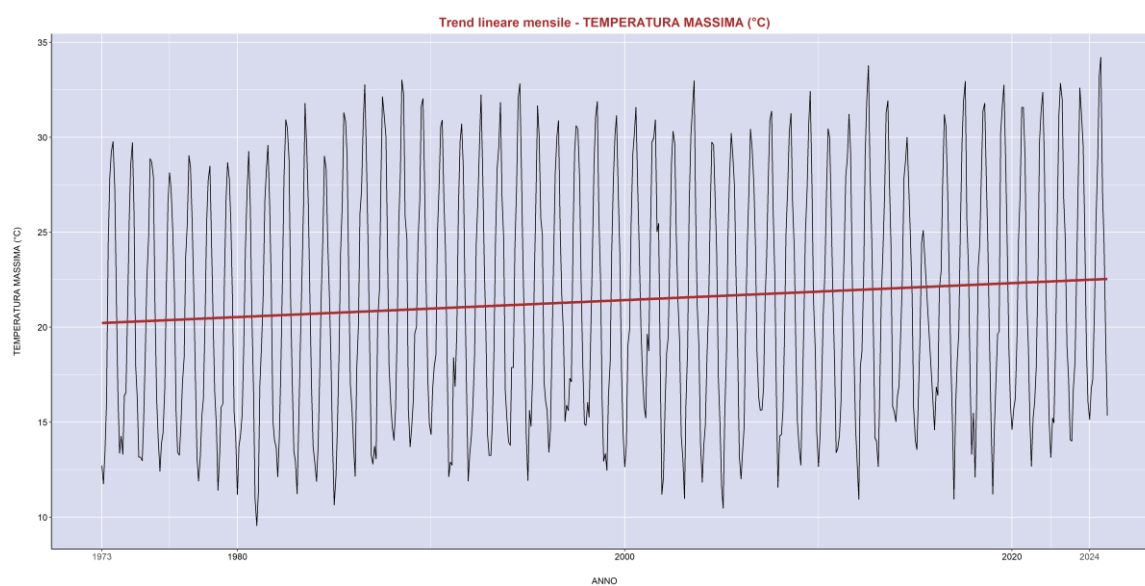


Figura 88. Trend lineare della serie delle temperature massime aggregate mensilmente
(Pendenza del trend = $0,05\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{anno}$ Errore standard = $0,02$)

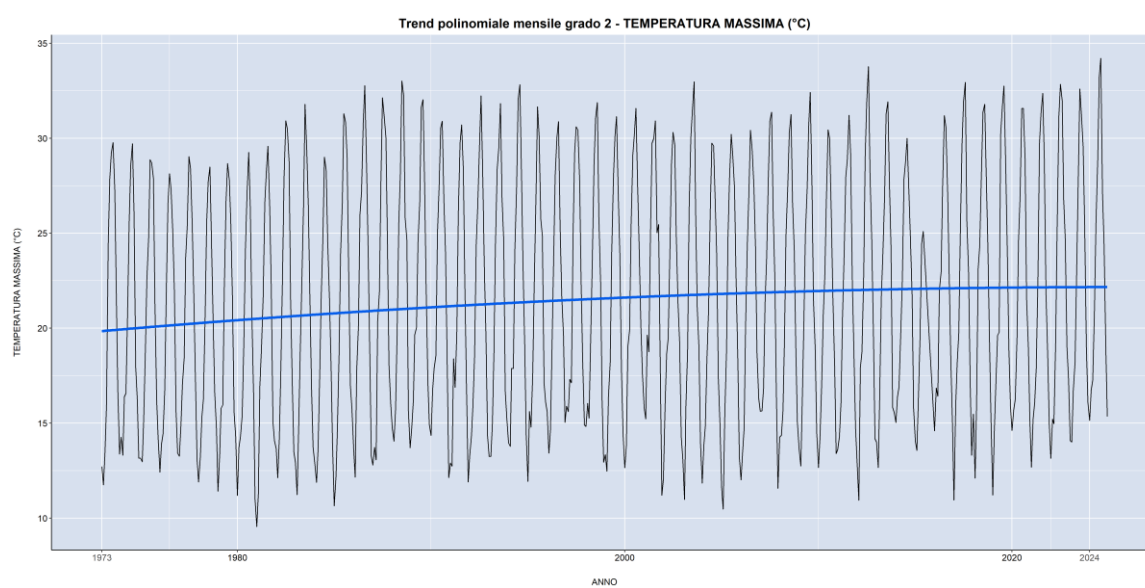


Figura 89. Trend polinomiale di secondo grado della serie delle temperature massime aggregate mensilmente

Temperature minime - Serie mensile e trend

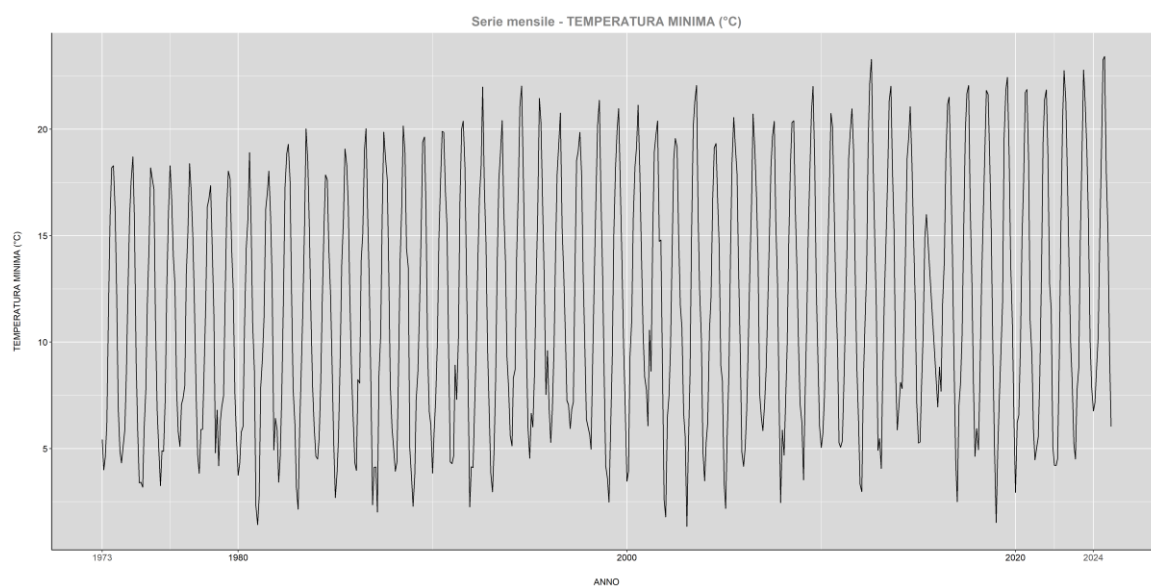


Figura 90. Serie temporale delle temperature minime aggregate mensilmente nel periodo analizzato (1973-2024) registrata presso la stazione di Napoli Capodichino

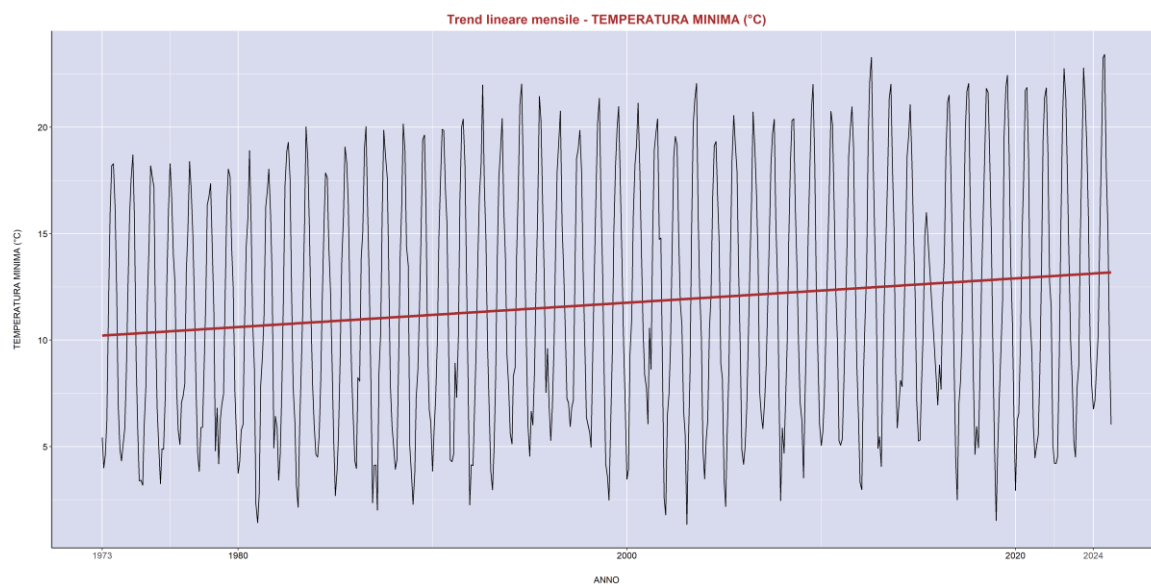


Figura 91. Trend lineare della serie delle temperature minime aggregate mensilmente
(Pendenza del trend = 0,06 °C/anno Errore standard = 0,02)

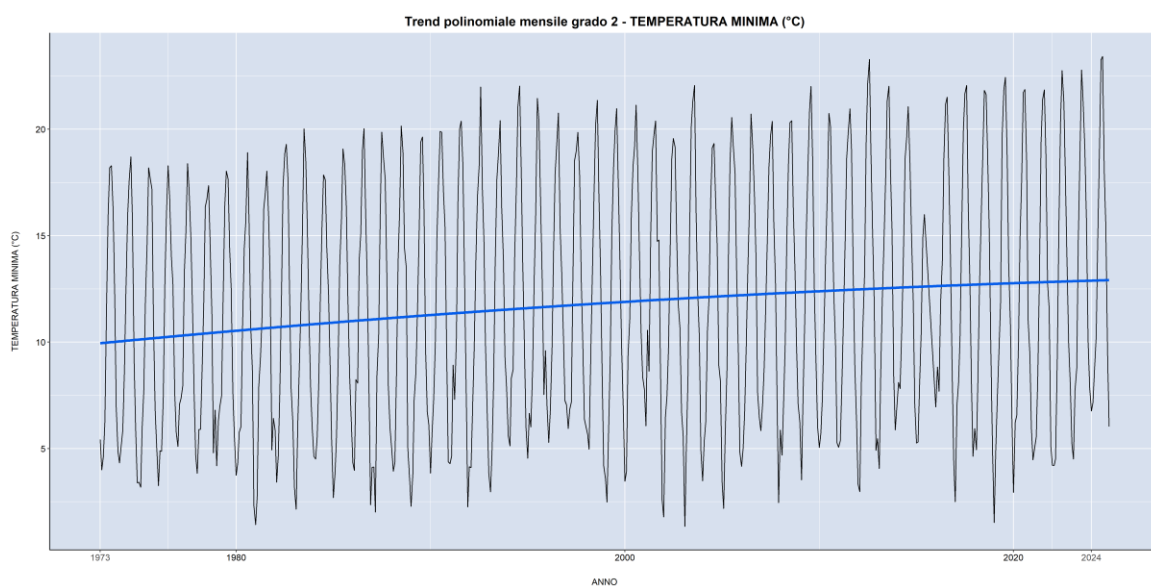


Figura 92. Trend polinomiale di secondo grado della serie delle temperature minime aggregate mensilmente

Temperature medie - Serie mensile e trend

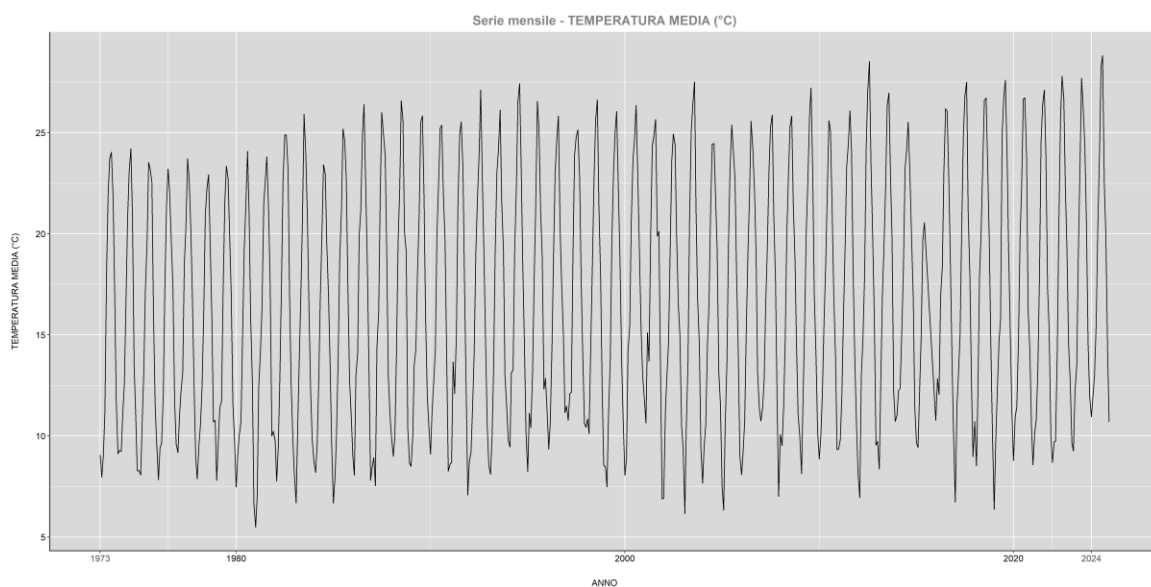


Figura 93. Serie temporale delle temperature medie aggregate mensilmente nel periodo analizzato (1973-2024) registrata presso la stazione di Napoli Capodichino

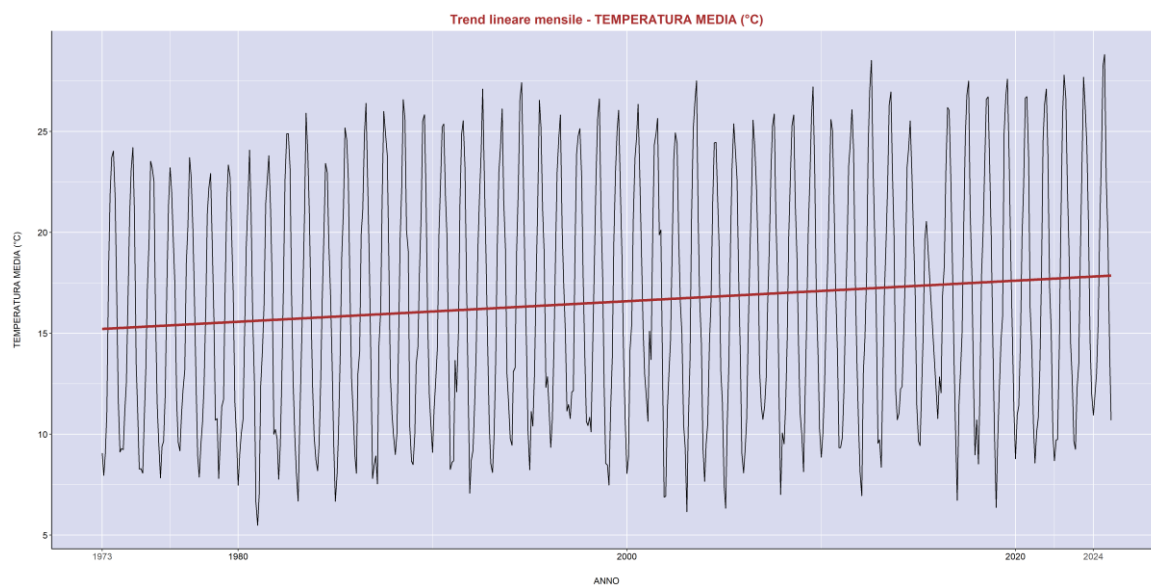


Figura 94. Trend lineare della serie delle temperature medie aggregate mensilmente
(Pendenza del trend = $0,05\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{anno}$ Errore standard = $0,02$)

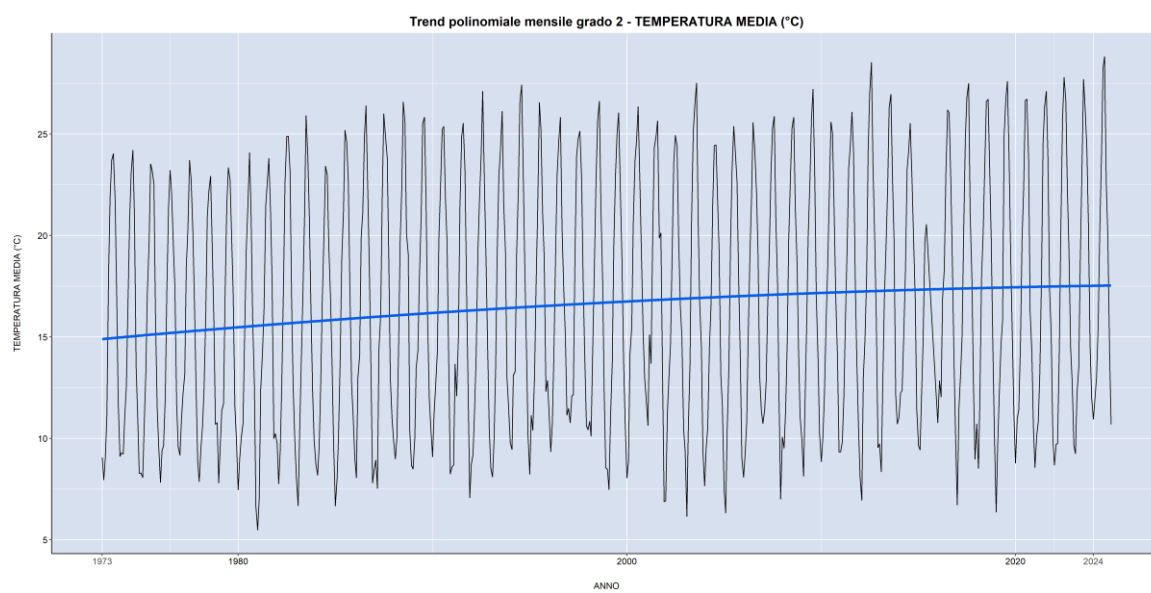


Figura 95. Trend polinomiale di secondo grado della serie delle temperature medie aggregate mensilmente

Temperature massime - Serie annuale e trend

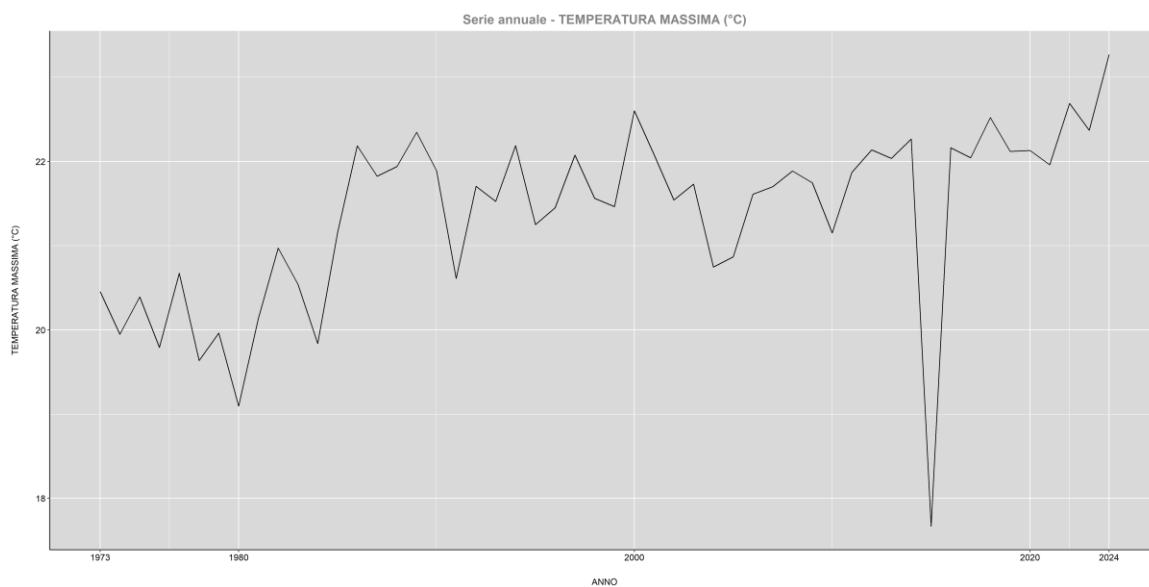


Figura 96. Serie temporale delle temperature massime aggregate annualmente nel periodo analizzato (1973-2024) registrata presso la stazione di Napoli Capodichino

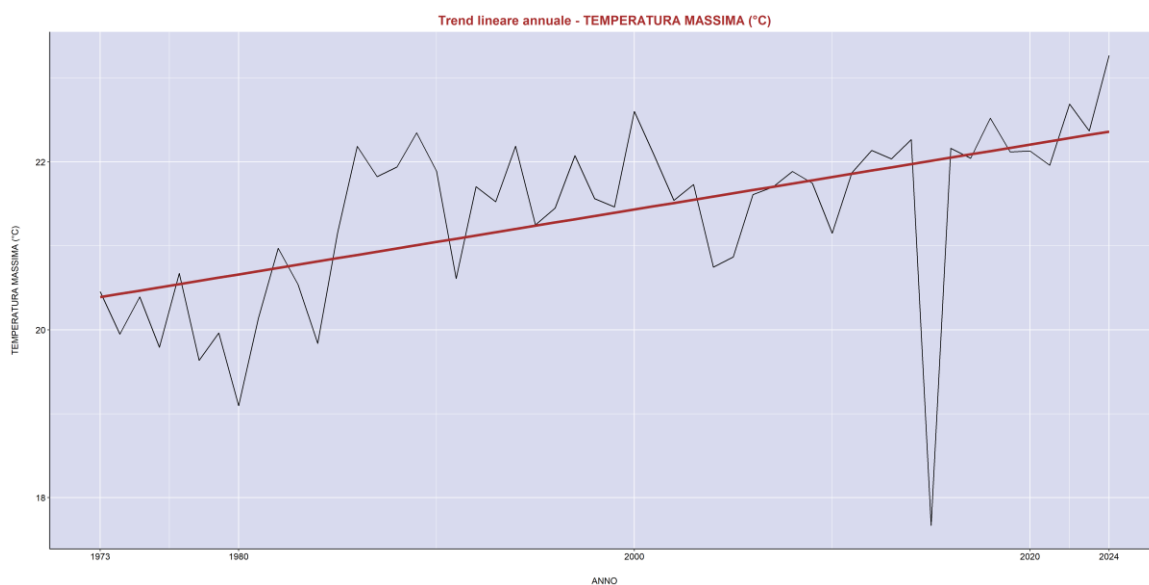


Figura 97. Trend lineare della serie delle temperature massime aggregate annualmente (Pendenza del trend = 0,04 °C/anno Errore standard = 0,008)

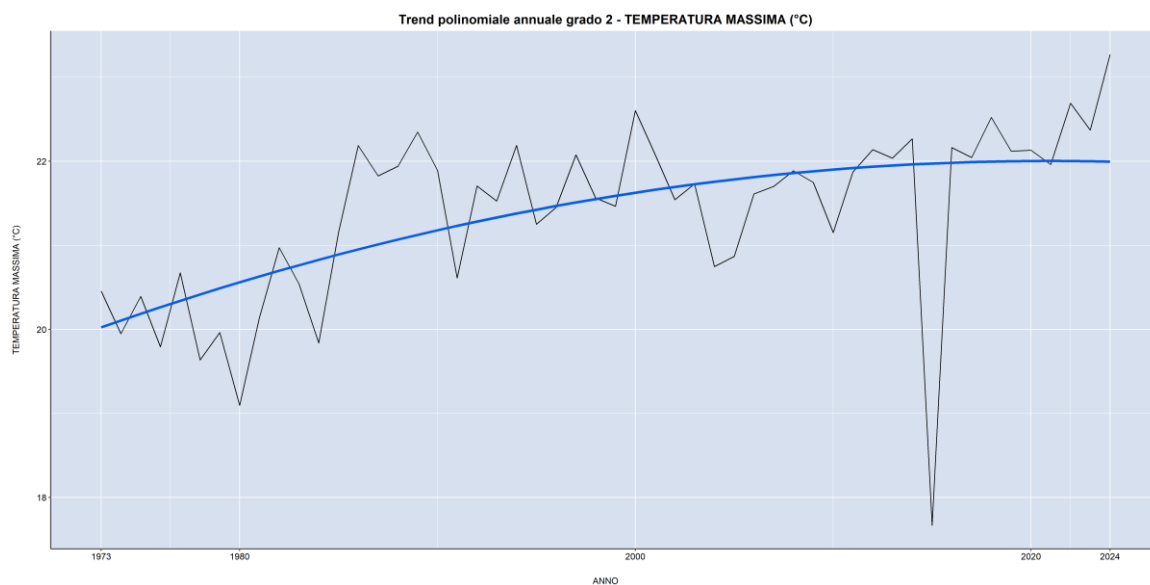


Figura 98. Trend polinomiale di secondo grado della serie delle temperature massime aggregate annualmente

Temperature minime - Serie annuale e trend

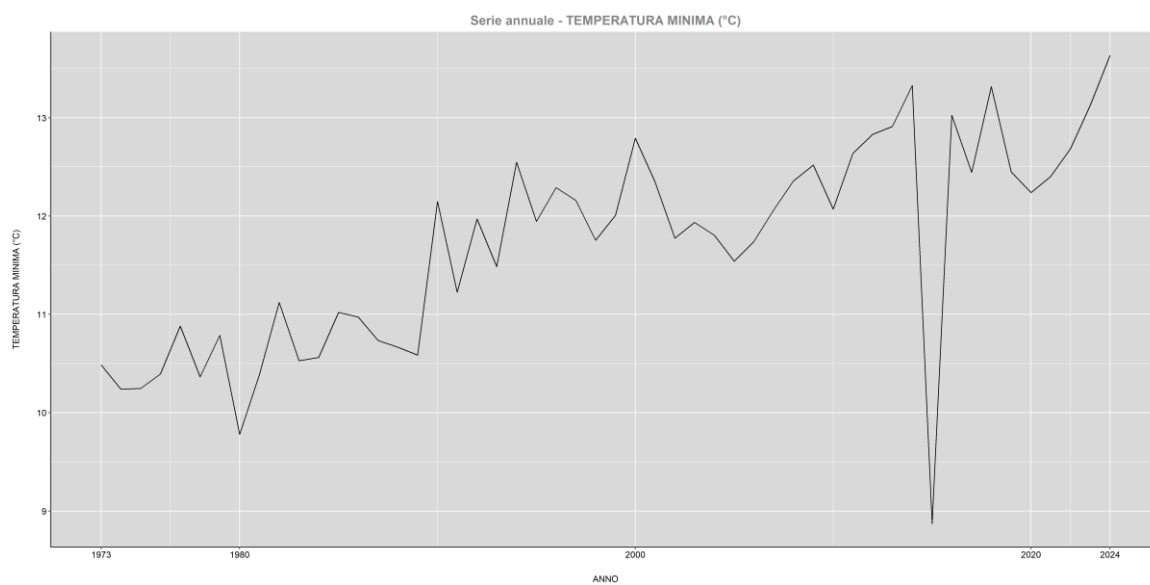


Figura 99. Serie temporale delle temperature minime aggregate annualmente nel periodo analizzato (1973-2024) registrata presso la stazione di Napoli Capodichino

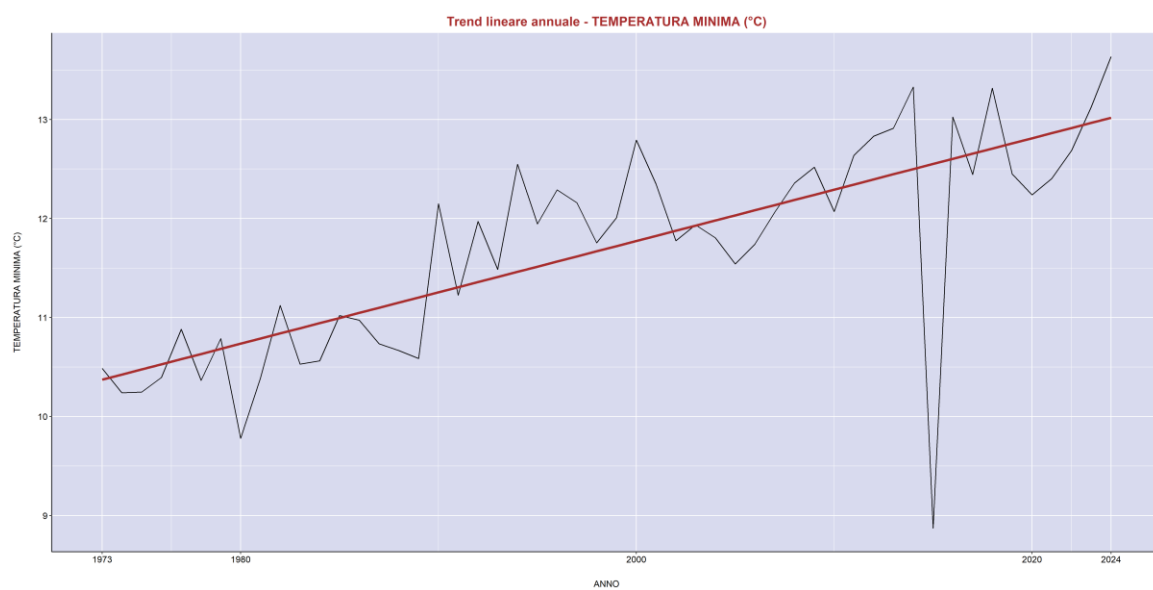


Figura 100. Trend lineare della serie delle temperature minime aggregate annualmente
(Pendenza del trend = $0,05\text{ }^{\circ}\text{C/anno}$ Errore standard = $0,006$)

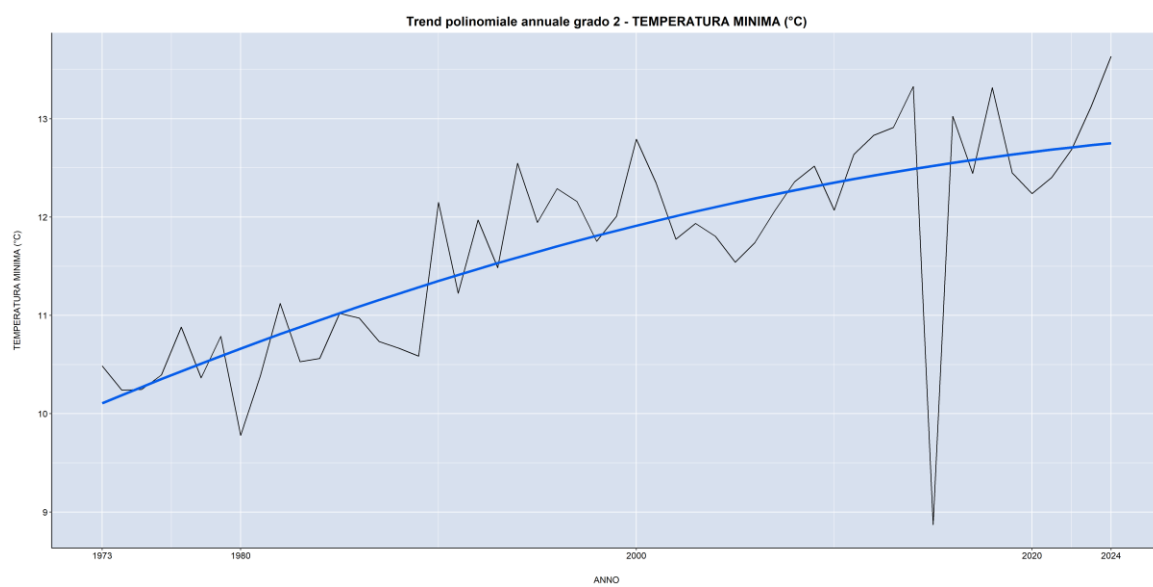


Figura 101. Trend polinomiale di secondo grado della serie delle temperature minime aggregate annualmente

Temperature medie - Serie annuale e trend

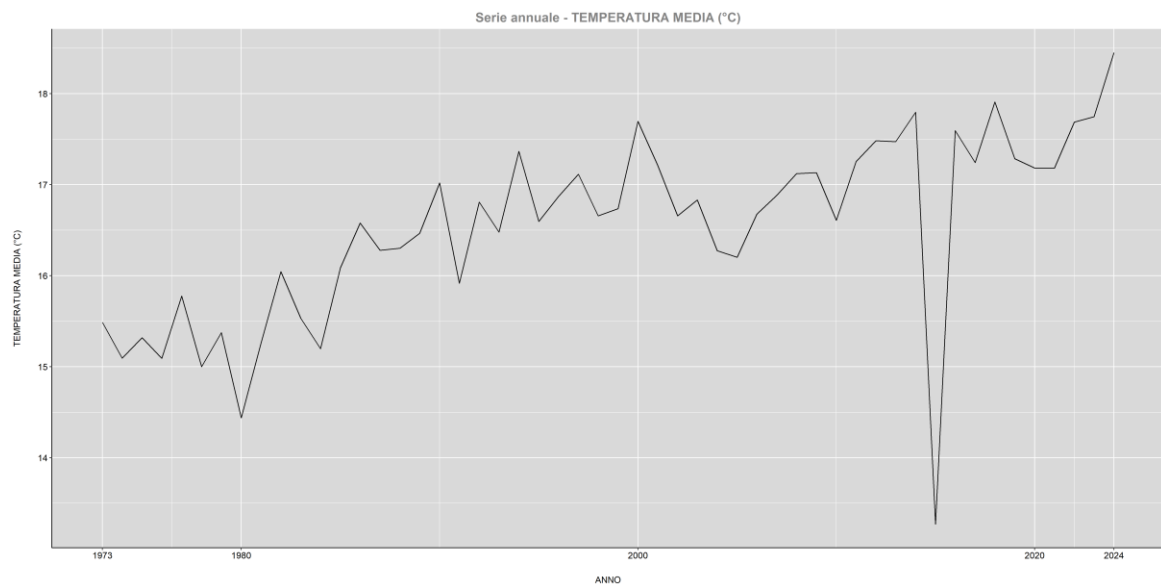


Figura 102. Serie temporale delle temperature medie aggregate annualmente nel periodo analizzato (1973-2024) registrata presso la stazione di Napoli Capodichino

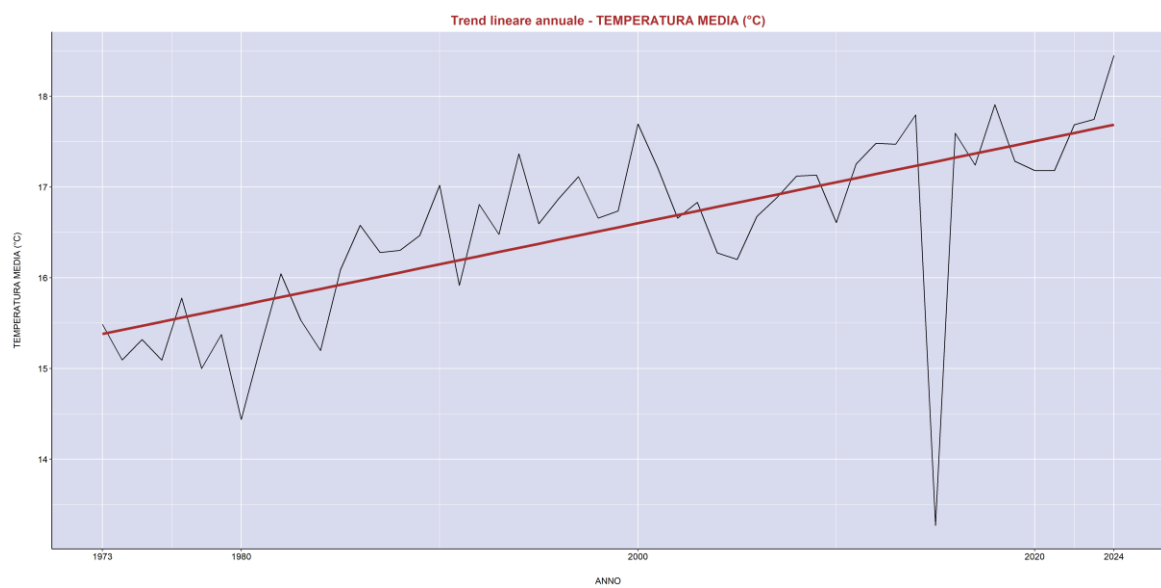


Figura 103. Trend lineare della serie delle temperature medie aggregate annualmente (Pendenza del trend = 0,05 °C/anno Errore standard = 0,007)

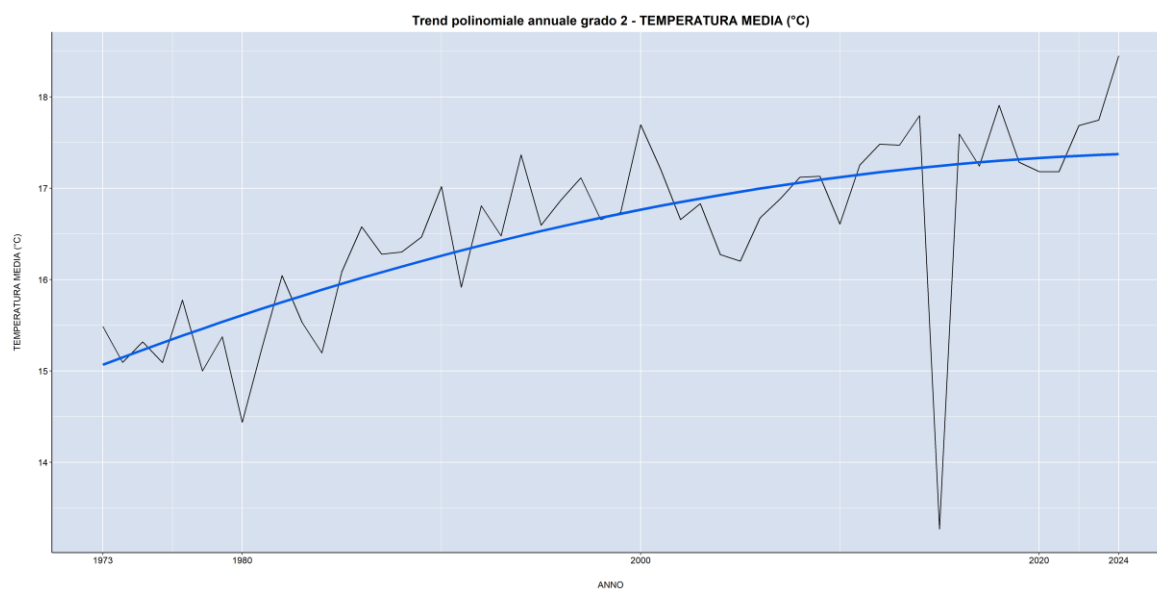


Figura 104. Trend polinomiale di secondo grado della serie delle temperature medie aggregate annualmente

Temperature massime, minime e medie - Autocorrelazione mensile

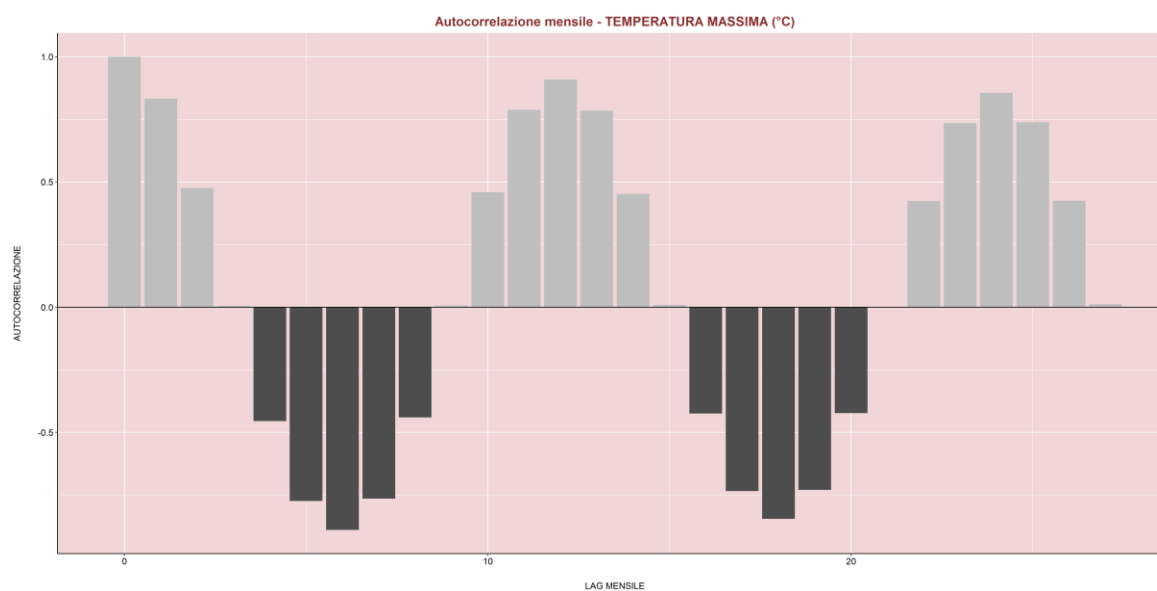


Figura 105. Funzione di autocorrelazione della serie delle temperature massime aggregate mensilmente

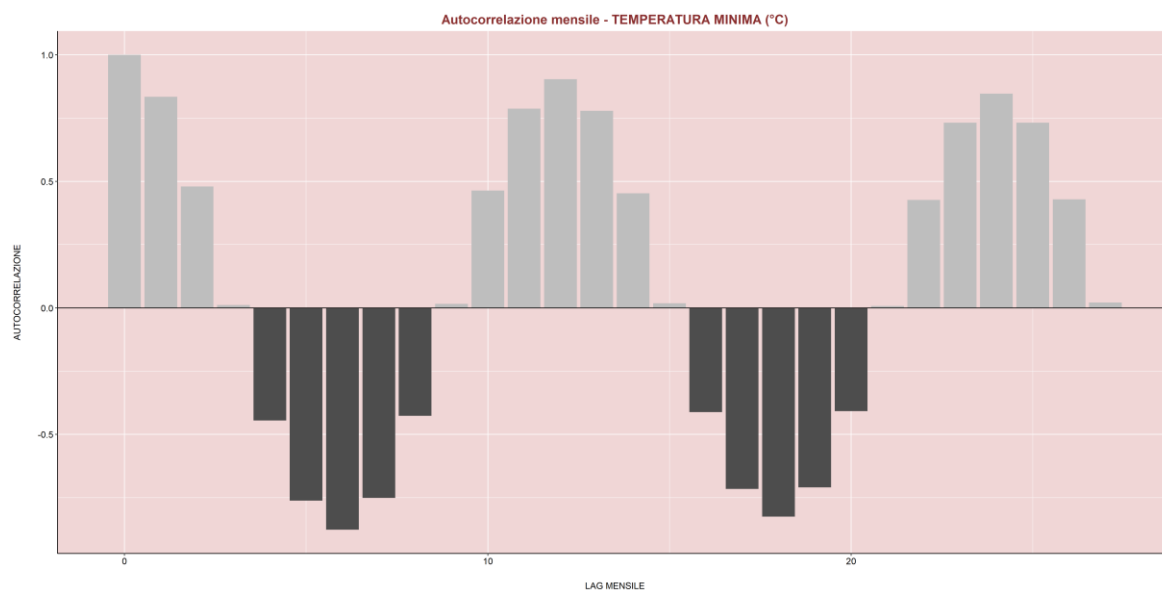


Figura 106. Funzione di autocorrelazione della serie delle temperature minime aggregate mensilmente

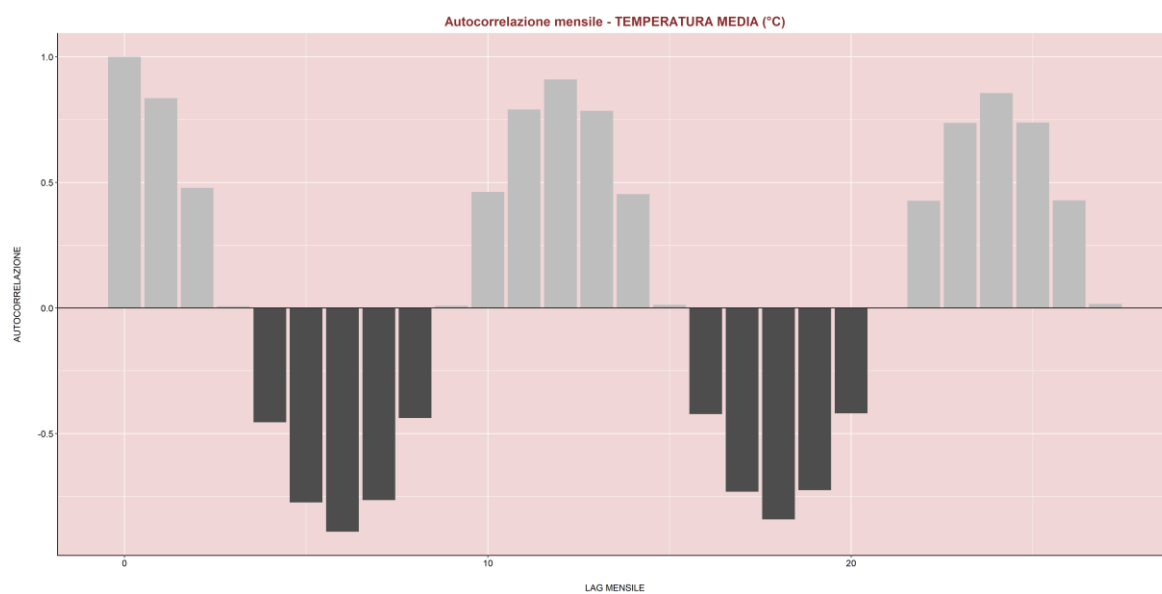


Figura 107. Funzione di autocorrelazione della serie delle temperature medie aggregate mensilmente

Temperature massime, minime e medie - Autocorrelazione annuale

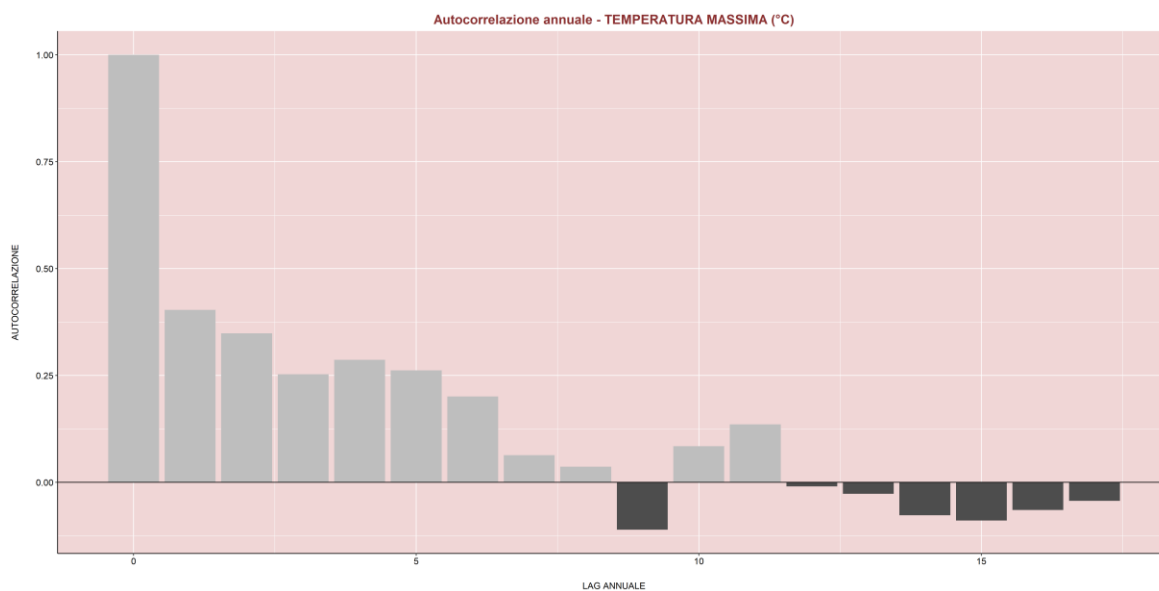


Figura 108. Funzione di autocorrelazione della serie delle temperature massime aggregate annualmente

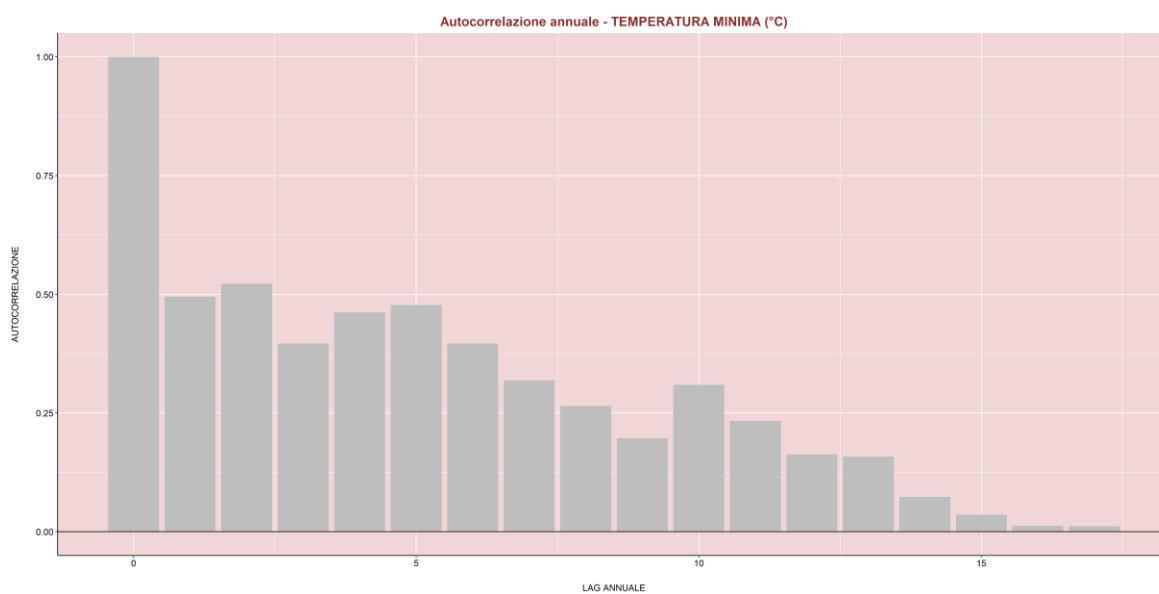


Figura 109. Funzione di autocorrelazione della serie delle temperature minime aggregate annualmente

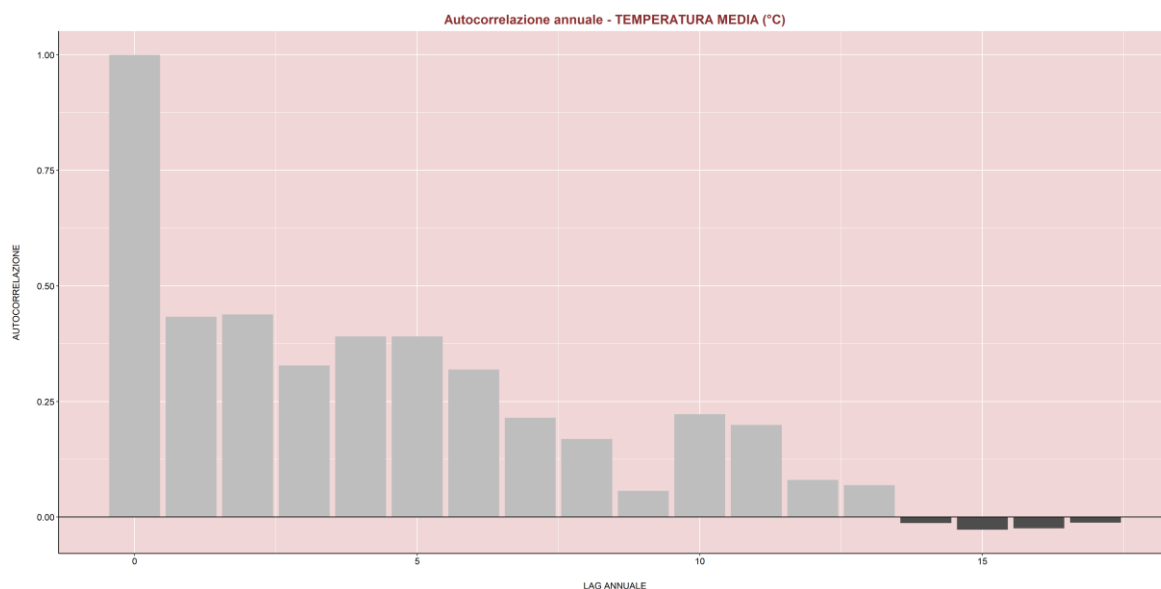


Figura 110. Funzione di autocorrelazione della serie delle temperature medie aggregate annualmente

L'esame delle dinamiche climatiche del capoluogo campano, basato su un dataset le cui registrazioni prendono avvio nel 1973, rivela un quadro statistico notevolmente più irregolare rispetto agli altri centri urbani analizzati. Nonostante ciò, l'osservazione delle serie temporali giornaliere, anche in questo caso fisiologicamente dominata dalla marcata variabilità stagionale dei dati, restituisce un segnale di innalzamento termico di fondo inequivocabile.

Applicando il trend lineare ai dati dei tre parametri, si osserva un incremento costante, delineato da una pendenza pari a $0,045\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{anno}$ (con errore standard di $0,003$) per le massime, $0,057\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{anno}$ (errore standard $0,003$) per le minime e $0,051\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{anno}$ (errore standard $0,003$) per le temperature medie. Tali valori corrispondono rispettivamente ad un aumento di $0,45\text{ }^{\circ}\text{C}$, $0,57\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $0,51\text{ }^{\circ}\text{C}$ ogni dieci anni.

Il modello polinomiale di grado 2 risulta pressoché simile per tutti e tre i parametri analizzati ed asseconda l'andamento del trend lineare, abbozzando però una lieve convessità. Tale risultato, seppur disturbato dal forte rumore intrinseco e dalle lacune

presenti nei dati della serie, suggerisce una tendenza all'accelerazione dei tre parametri di temperatura considerati.

Passando alle serie aggregate su scala mensile e, soprattutto, annuale, emerge in tutta evidenza il carattere anomalo dei risultati ottenuti per questo capoluogo.

I trend lineari a scala annuale confermano la crescita termica generale, registrando 0,039 °C/anno (errore standard 0,008) per le massime, 0,052 °C/anno (errore standard 0,006) per le minime e 0,045 °C/anno (errore standard 0,007) per le temperature medie.

L'andamento delle tre serie annuali appare, però disturbato: attorno al 2015, infatti, si verifica un repentino crollo termico negativo di proporzioni eccezionali. Questo singolo, drastico evento condiziona pesantemente, in particolare, la curvatura del trend polinomiale di grado 2 che risulta, per tutti e tre i parametri analizzati, caratterizzato da una forma poco rappresentativa dell'andamento delle tre serie negli ultimi decenni. Sulla scala annuale, infatti, la parabola viene matematicamente "tirata verso il basso" dalla profonda flessione dell'anno 2015, provocando un sensibile cambio di pendenza: dopo una prima fase di ripida e costante crescita iniziata negli anni '70, la curva arresta la sua accelerazione intorno al decennio 2010-2020, piegandosi in un andamento decisamente più piatto e quasi stazionario negli ultimissimi anni. La causa di tale deformità grafica potrebbe essere ricondotta all'elevato numero di rilevazioni mancanti dell'anno 2015.

A livello mensile, l'alta densità dei dati permette alla curva di assorbire l'anomalia, mantenendo la sua funzione di traccia di fondo in progressiva ascesa. Il trend polinomiale di secondo grado a scala mensile restituisce, infatti, un grafico di forma convessa che parla di un innalzamento continuo negli anni, di tutti e tre i parametri di temperatura considerati.

L'impatto di tale profonda discontinuità si riverbera inevitabilmente sull'analisi autocorrelativa.

Se da un lato l'autocorrelazione mensile disegna la consueta e impeccabile onda sinusoidale, dettata dal tipico regime stagionale del clima, dall'altro l'autocorrelazione annuale restituisce l'immagine di un sistema assai più perturbato. A differenza della lenta e inesorabile inerzia riscontrata altrove, a Napoli il grafico ACF relativo alle temperature massime presenta un decadimento dei valori positivi rapido ed irregolare. Tale andamento assume valori negativi già a 9 lag, per poi riacquisire la positività a 10 ed 11 lag. Da 12 lag in poi il grafico ridiscendere sotto la soglia dello zero fino ad azzerarsi.

Il correlogramma delle temperature minime, invece, decresce con irregolarità, ma mantiene valori positivi fino a 17 lag, valore oltre il quale risulta nullo.

Il grafico dell'autocorrelazione riferita alle temperature medie riflette le peculiarità dei correlogrammi dei due estremi, decrescendo con una certa irregolarità fino a 13 lag, valore oltre al quale si negativizza prima di assumere valore zero.

Tali risultati certificano la brusca rottura della similarità tra gli anni: il picco anomalo ha spezzato la persistenza statistica di lungo periodo, evidenziando la necessità di condurre nuove ricerche per appurare l'origine di tale deformità grafica e risolverne le criticità statistiche correlate.

Napoli Capodichino	Pendenze Temperature massime	Pendenze Temperature minime	Pendenze Temperature medie
	[°C/anno $\pm$ errore standard]	[°C/anno $\pm$ errore standard]	[°C/anno $\pm$ errore standard]
Serie giornaliere	0,05 $\pm$ 0,003	0,06 $\pm$ 0,003	0,05 $\pm$ 0,003
Serie mensili	0,05 $\pm$ 0,02	0,06 $\pm$ 0,02	0,05 $\pm$ 0,02
Serie annuali	0,04 $\pm$ 0,008	0,05 $\pm$ 0,006	0,05 $\pm$ 0,007

Tabella 7. Tabella riassuntiva delle pendenze dei trend lineari ottenute per la stazione di Napoli Capodichino

Torino – Torino Giardini Reali

Come per la città di Milano, anche per il capoluogo piemontese sono disponibili serie giornaliere di dati climatici ultracentenarie. La stazione di Torino Giardini Reali, infatti, situata nell'area verde adiacente al complesso del Palazzo Reale, nel centro storico di Torino, raccoglie dati climatici dal 1787. La stazione fornisce sia i dati di temperatura originali che quelli omogenei, ovvero resi comparabili, eliminando l'influsso delle modifiche che, negli anni, hanno interessato le condizioni di rilevamento e la strumentazione utilizzata per le misurazioni. L'analisi statistica che segue è stata condotta utilizzando le temperature massime e minime omogenee disponibili per la stazione di Torino Giardini Reali.

Temperature massime - Serie giornaliera e trend

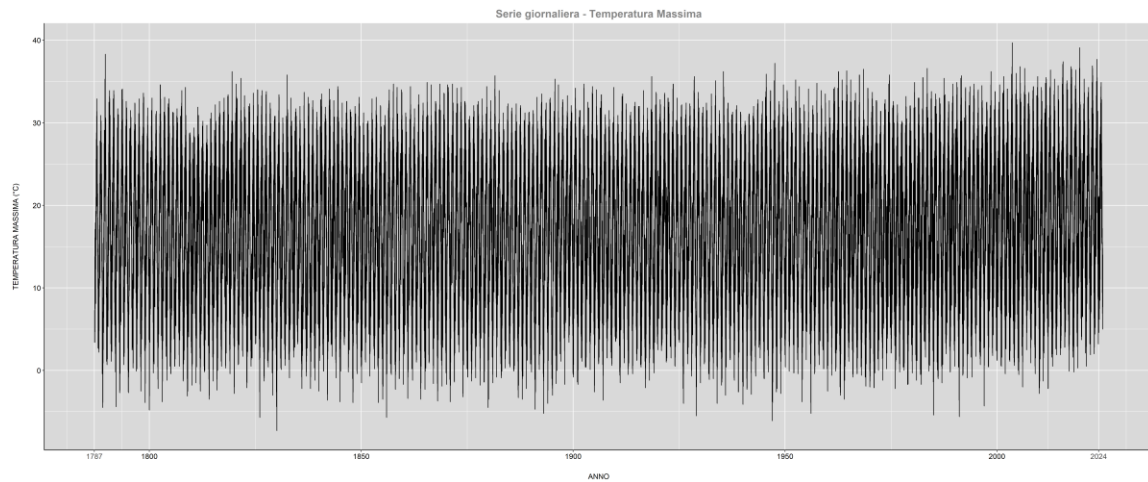


Figura 111. Serie temporale della temperatura massima giornaliera nel periodo analizzato (1787-2024) registrata presso la stazione di Torino Giardini Reali

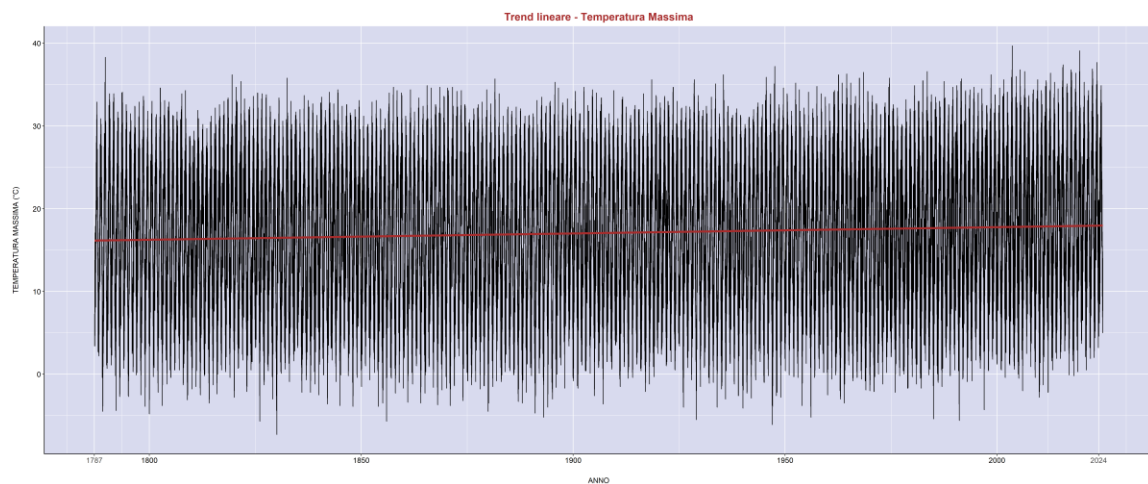


Figura 112. Trend lineare della serie delle temperature massime giornaliere
(Pendenza del trend = $0,008\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{anno}$ Errore standard = $0,0004$)

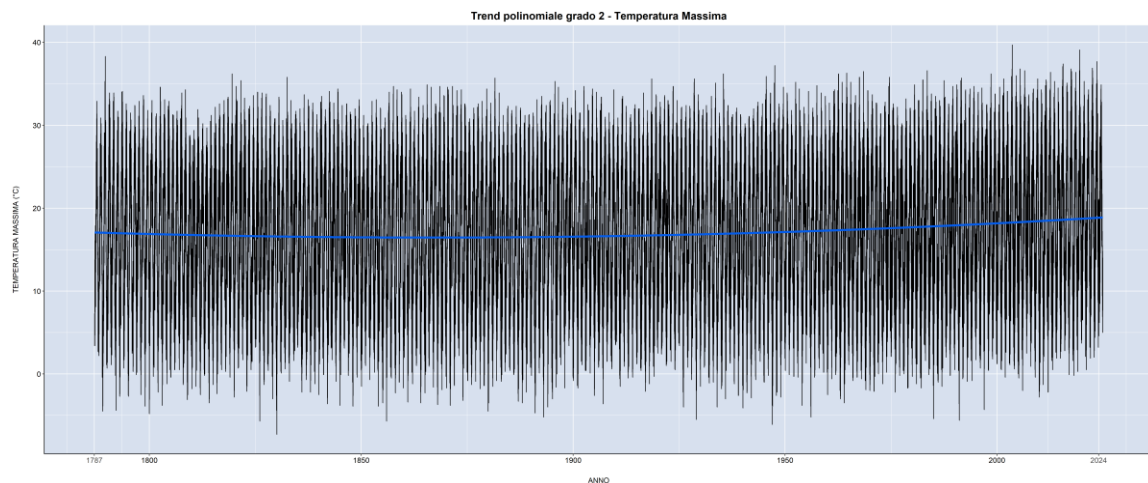


Figura 113. Trend polinomiale di secondo grado della serie delle temperature massime giornaliere

Temperature minime - Serie giornaliera e trend

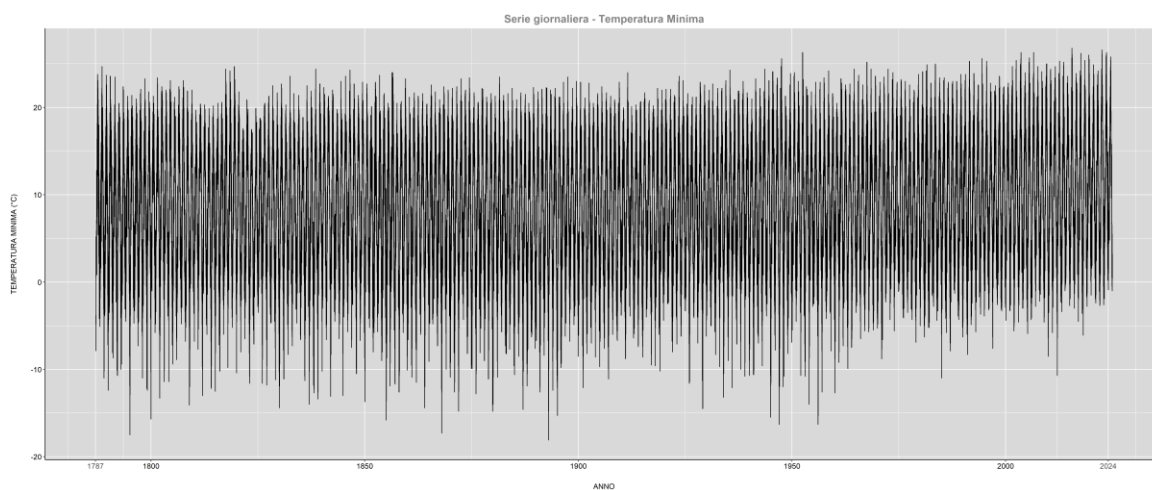


Figura 114. Serie temporale della temperatura minima giornaliera nel periodo analizzato (1787-2024) registrata presso la stazione di Torino Giardini Reali

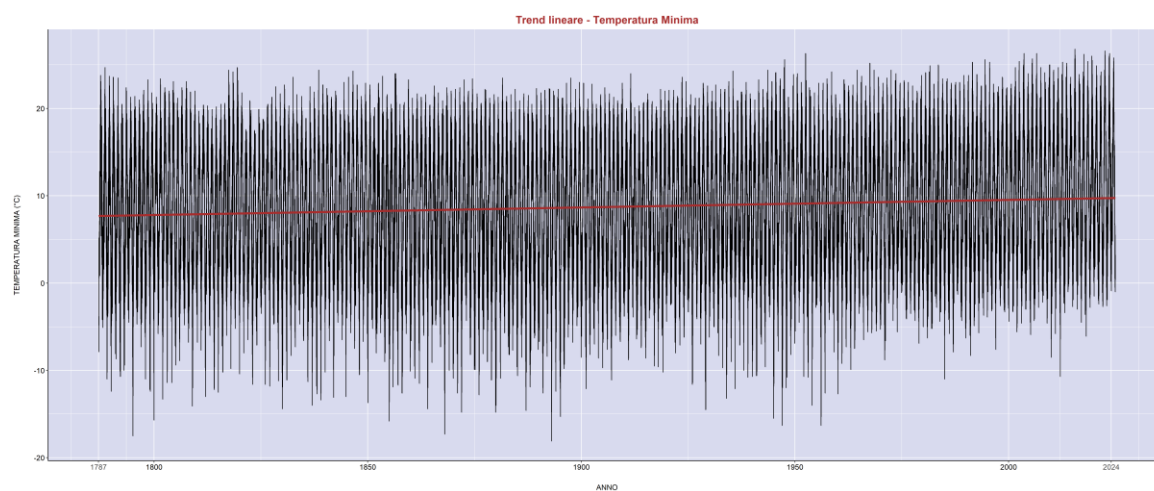


Figura 115. Trend lineare della serie delle temperature minime giornaliere
(Pendenza del trend= 0,009 °C/anno Errore standard = 0,0004)

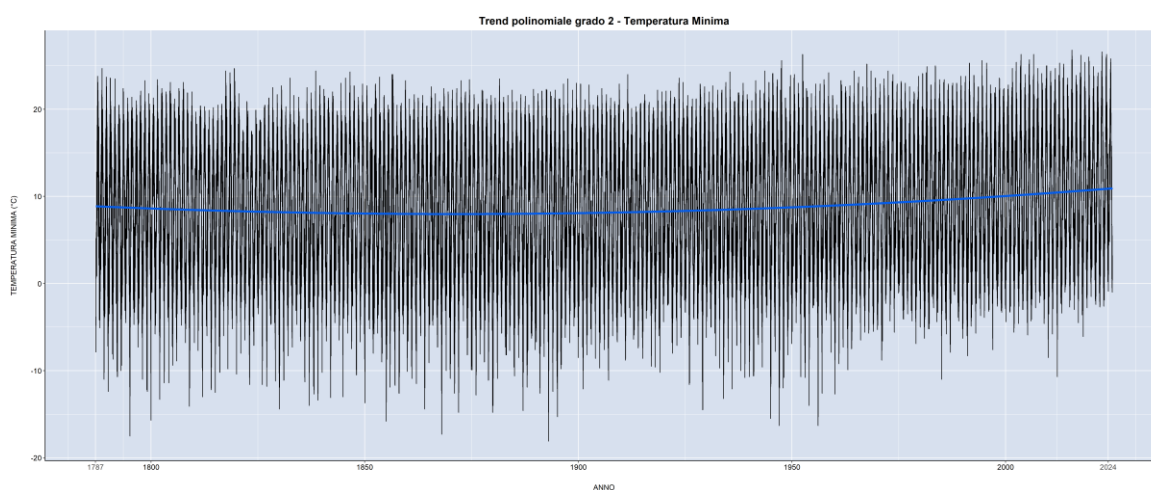


Figura 116. Trend polinomiale di secondo grado della serie delle temperature minime giornaliere

Temperature medie - Serie giornaliera e trend

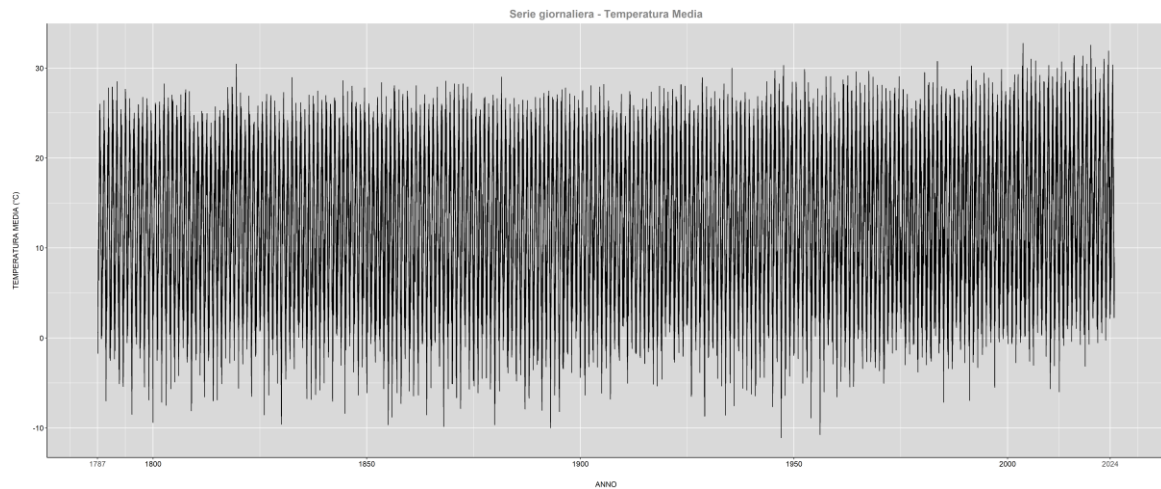


Figura 117. Serie temporale della temperatura media giornaliera nel periodo analizzato (1787-2024) registrata presso la stazione di Torino Giardini Reali

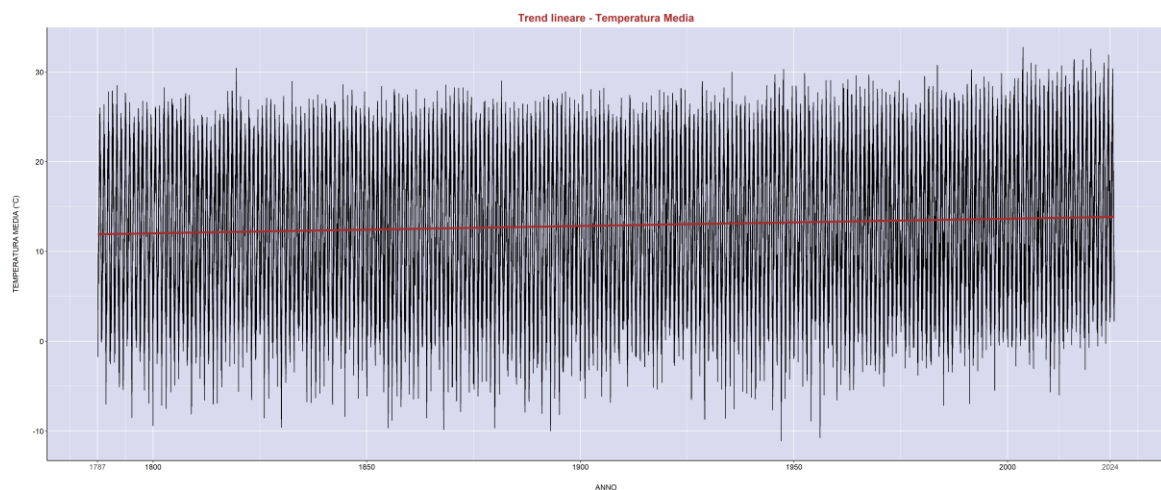


Figura 118. Trend lineare della serie delle temperature medie giornaliere
(Pendenza del trend = 0,008 °C/anno Errore standard = 0,0004)

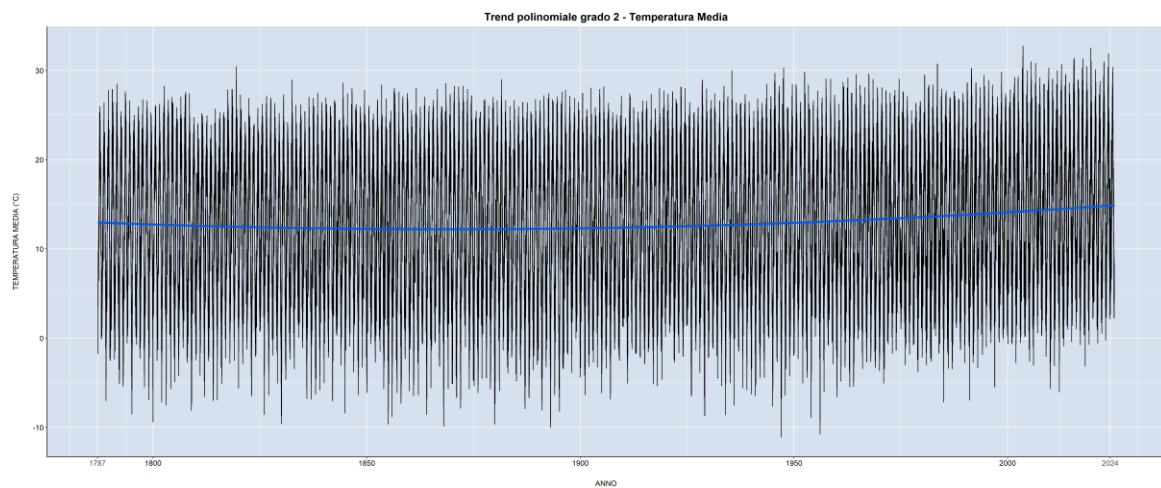


Figura 119. Trend polinomiale di secondo grado della serie delle temperature medie giornaliere

Temperature massime - Serie mensile e trend

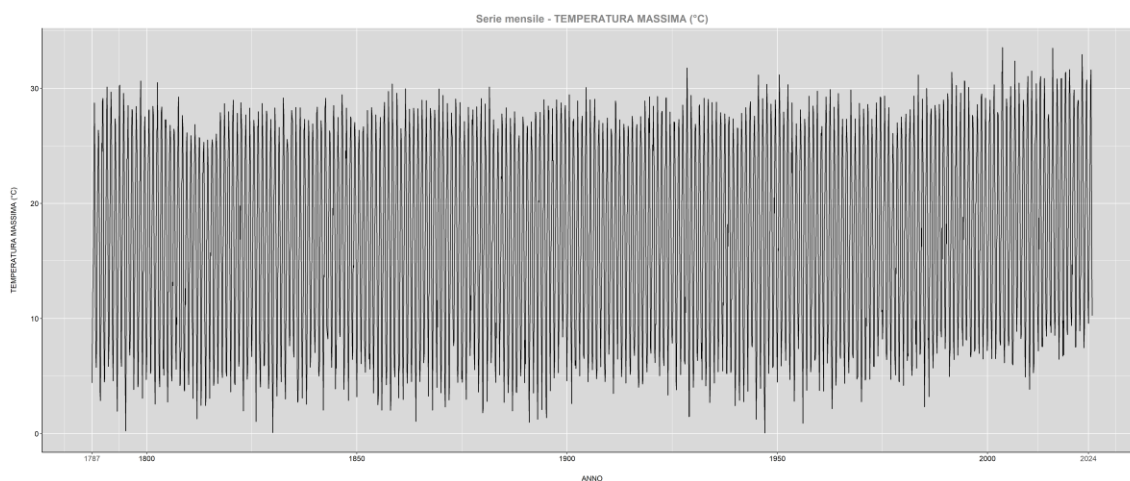


Figura 120. Serie temporale delle temperature massime aggregate mensilmente nel periodo analizzato (1787-2024) registrata presso la stazione di Torino Giardini Reali

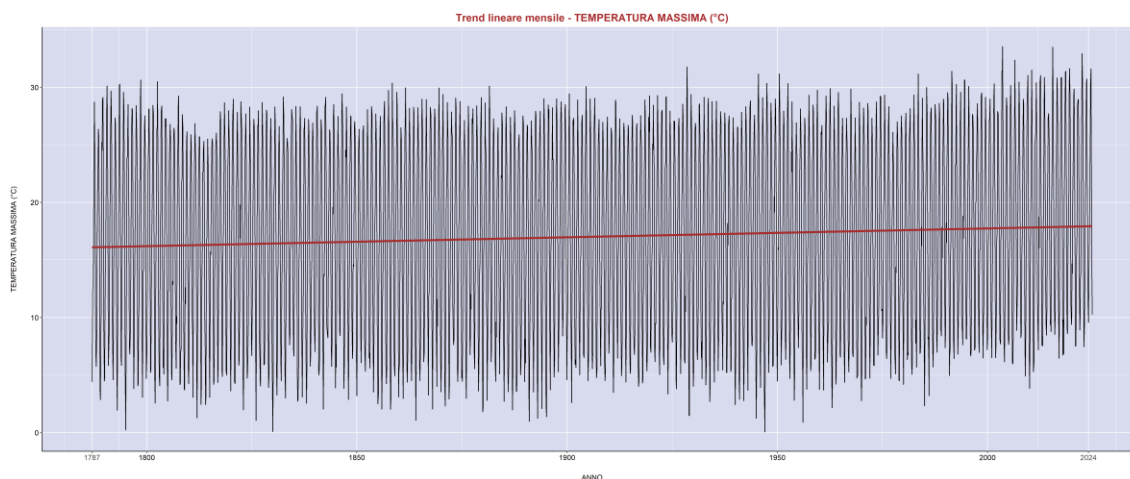


Figura 121. Trend lineare della serie delle temperature massime aggregate mensilmente
(Pendenza del trend = $0,008\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{anno}$ Errore standard = $0,002$)

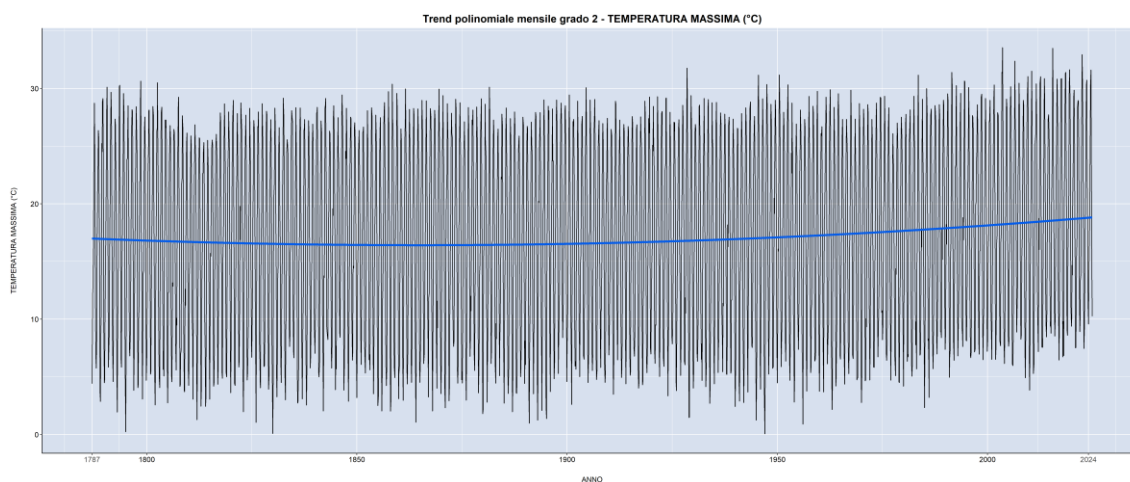


Figura 122. Trend polinomiale di secondo grado della serie delle temperature massime aggregate mensilmente

Temperature minime - Serie mensile e trend

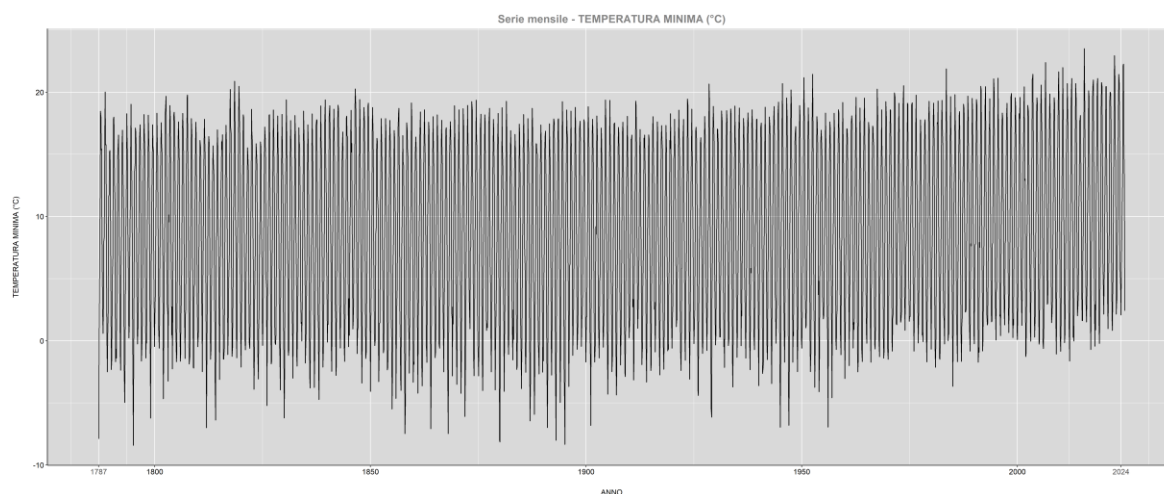


Figura 123. Serie temporale delle temperature minime aggregate mensilmente nel periodo analizzato (1787-2024) registrata presso la stazione di Torino Giardini Reali

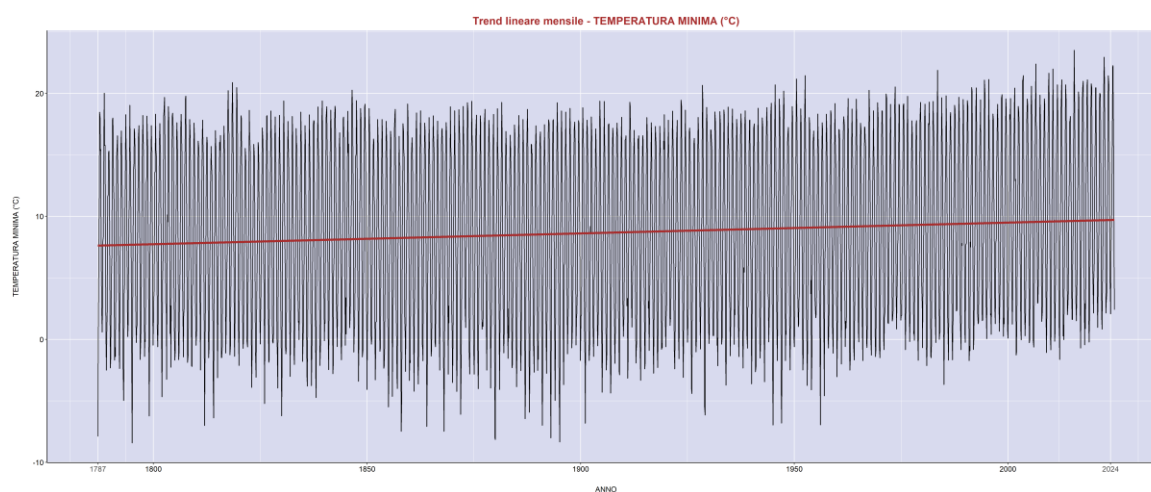


Figura 124. Trend lineare della serie delle temperature minime aggregate mensilmente
(Pendenza del trend = 0,009 °C/anno Errore standard = 0,002)

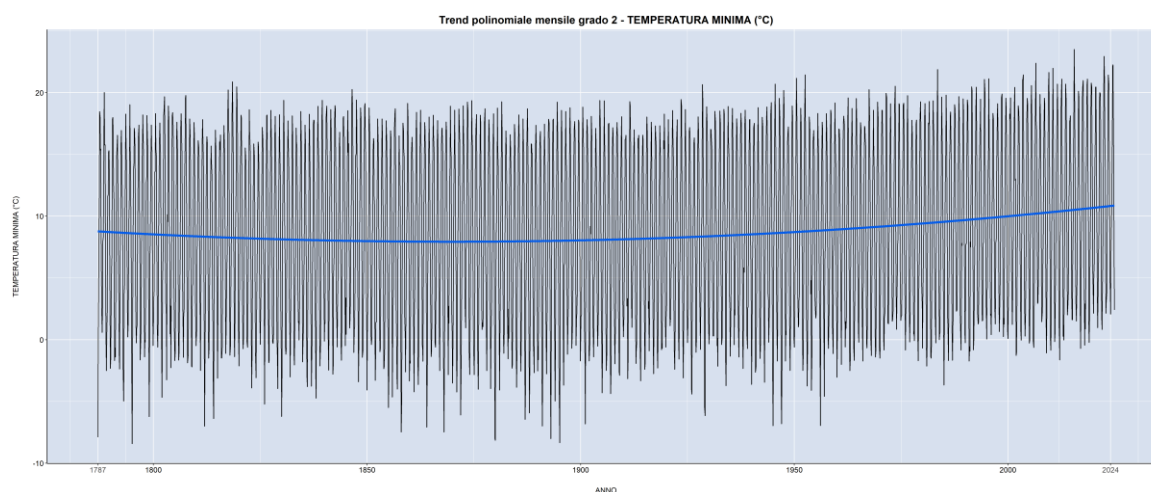


Figura 125. Trend polinomiale di secondo grado della serie delle temperature minime aggregate mensilmente

Temperature medie - Serie mensile e trend

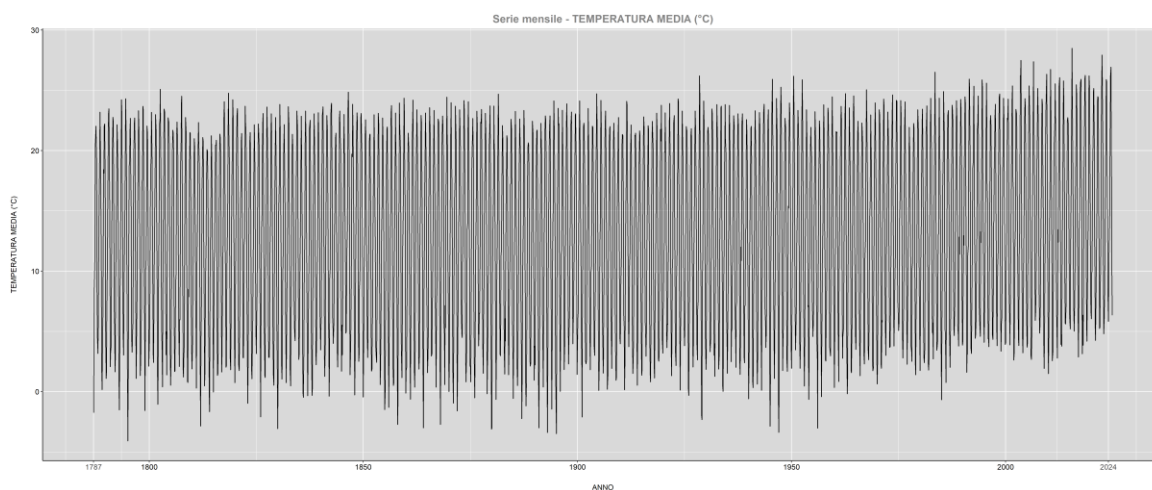


Figura 126. Serie temporale delle temperature medie aggregate mensilmente nel periodo analizzato (1787-2024) registrata presso la stazione di Torino Giardini Reali

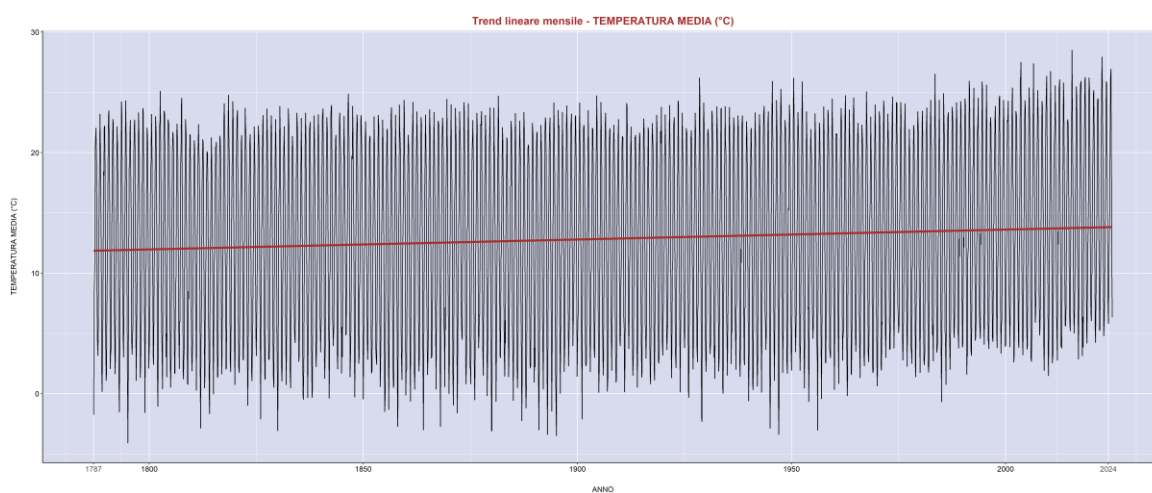


Figura 127. Trend lineare della serie delle temperature medie aggregate mensilmente
(Pendenza del trend = $0,008\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{anno}$ Errore standard = $0,002$)

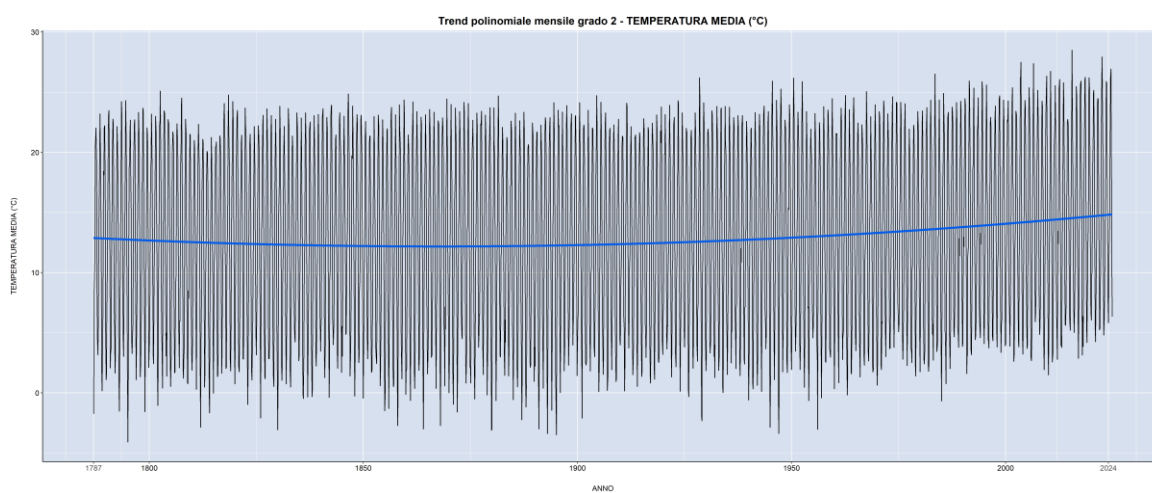


Figura 128. Trend polinomiale di secondo grado della serie delle temperature medie aggregate mensilmente

Temperature massime - Serie annuale e trend

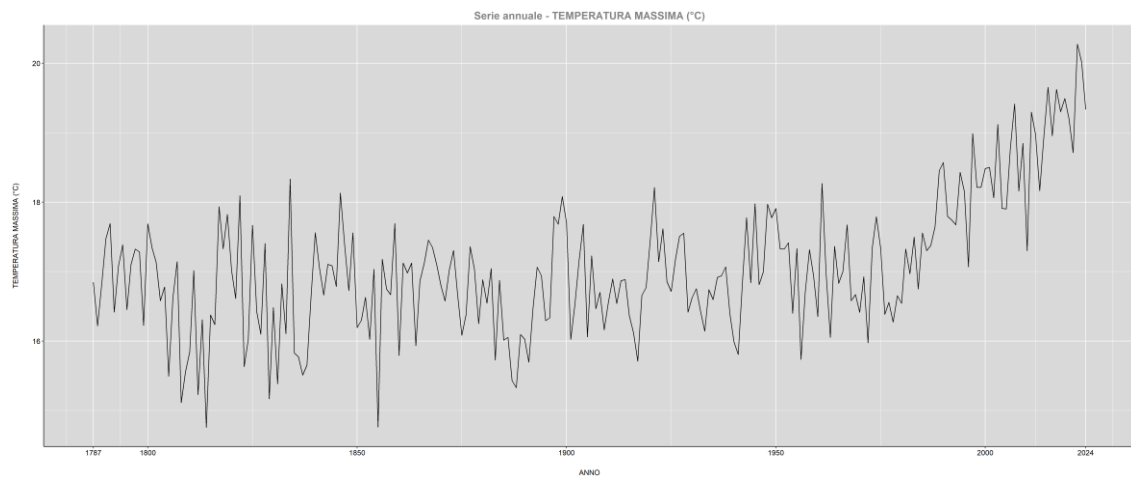


Figura 129. Serie temporale delle temperature massime aggregate annualmente nel periodo analizzato (1787-2024) registrata presso la stazione di Torino Giardini Reali

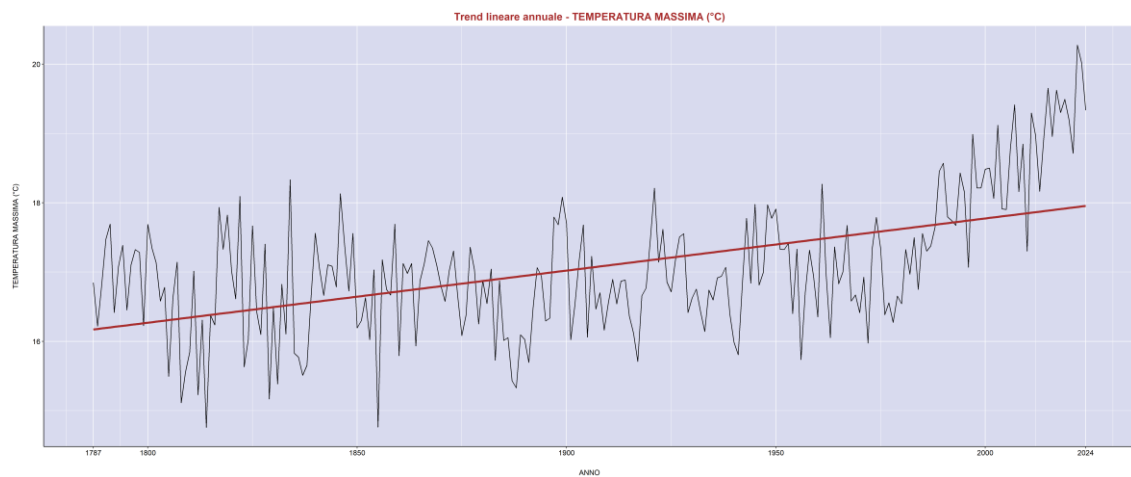


Figura 130. Trend lineare della serie delle temperature massime aggregate annualmente (Pendenza del trend = 0,008 °C/anno Errore standard = 0,0008)

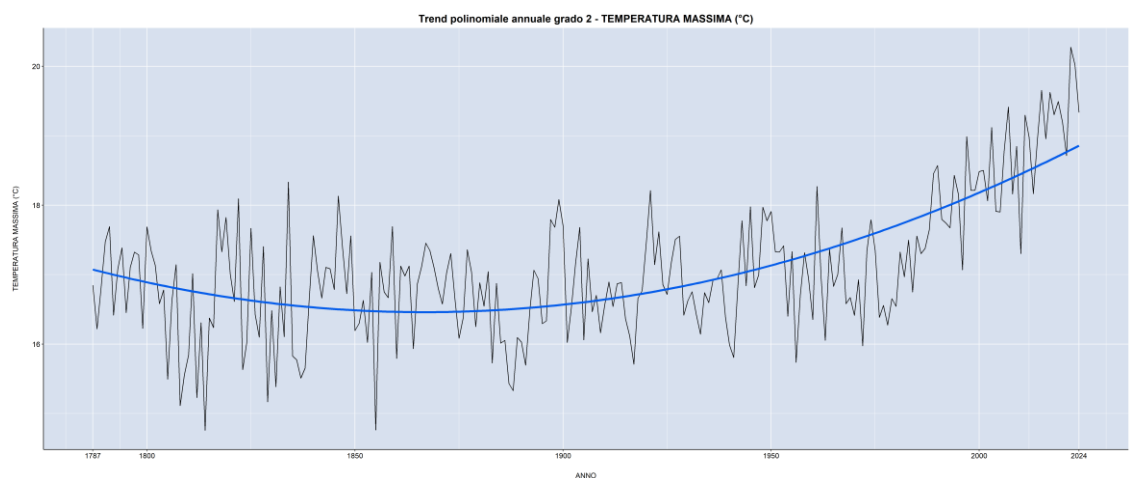


Figura 131. Trend polinomiale di secondo grado della serie delle temperature massime aggregate annualmente

Temperature minime - Serie annuale e trend

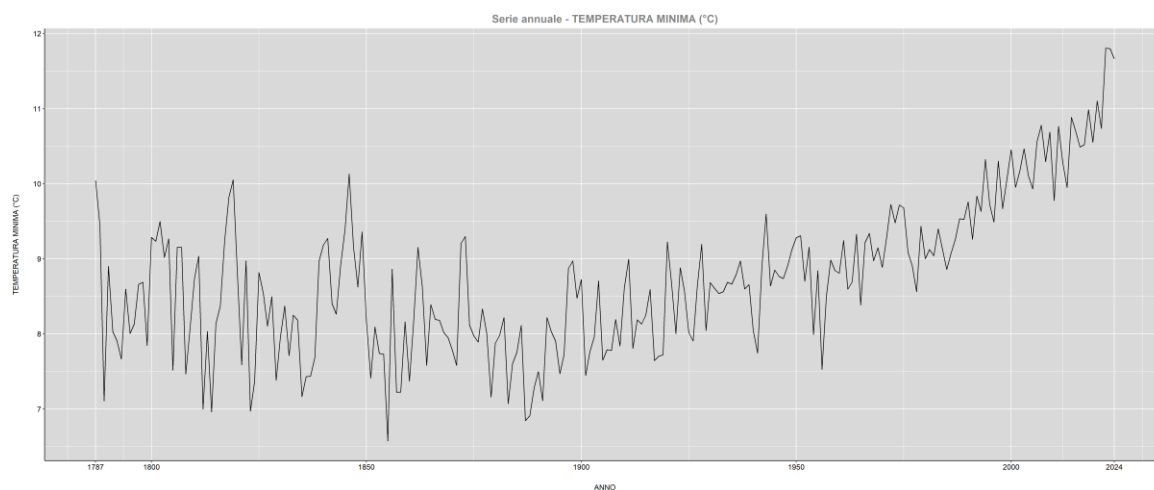


Figura 132. Serie temporale delle temperature minime aggregate annualmente nel periodo analizzato (1787-2024) registrata presso la stazione di Torino Giardini Reali

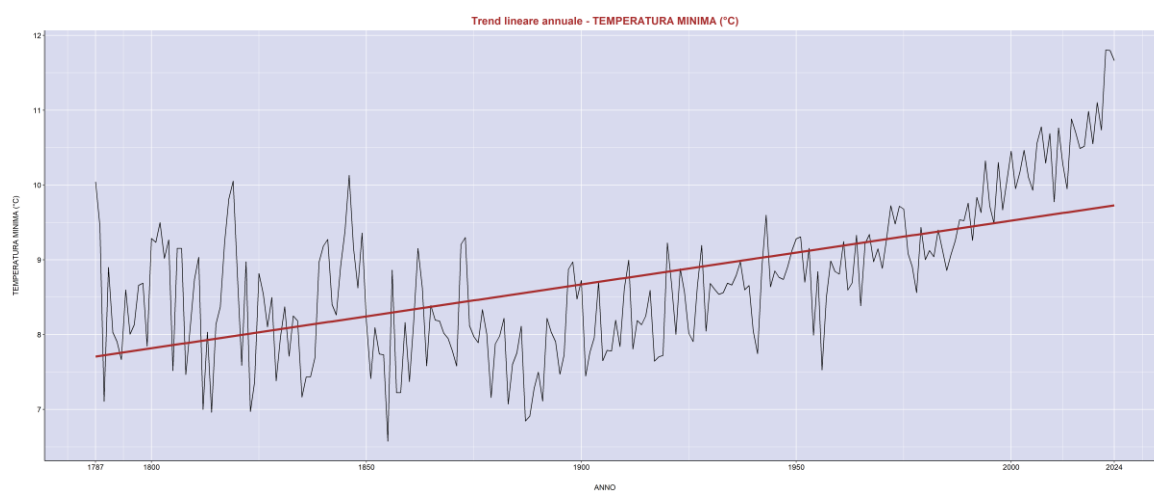


Figura 133. Trend lineare della serie delle temperature minime aggregate annualmente (Pendenza del trend = $0,009\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{anno}$ Errore standard = $0,0008$)

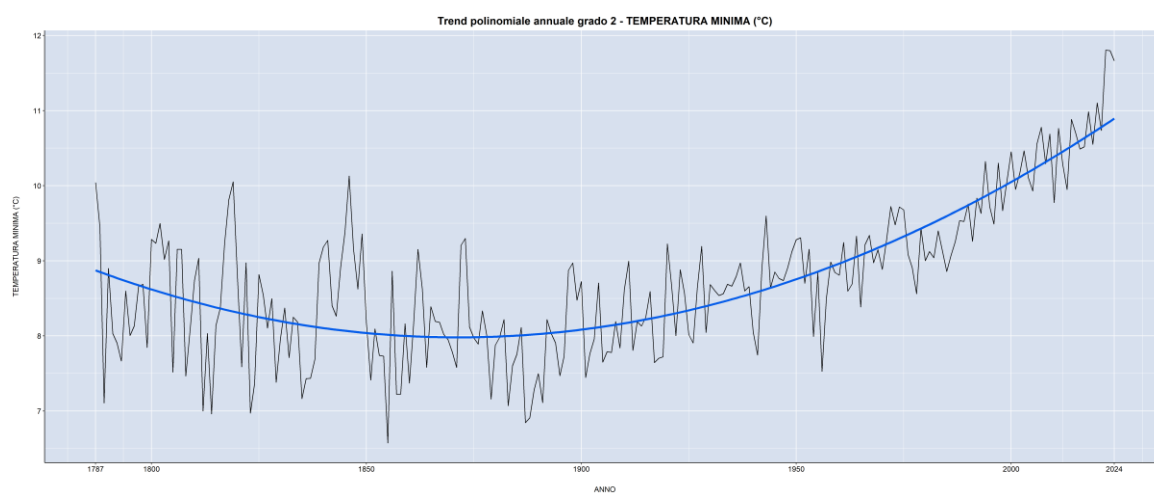


Figura 134. Trend polinomiale di secondo grado della serie delle temperature minime aggregate annualmente

Temperature medie - Serie annuale e trend

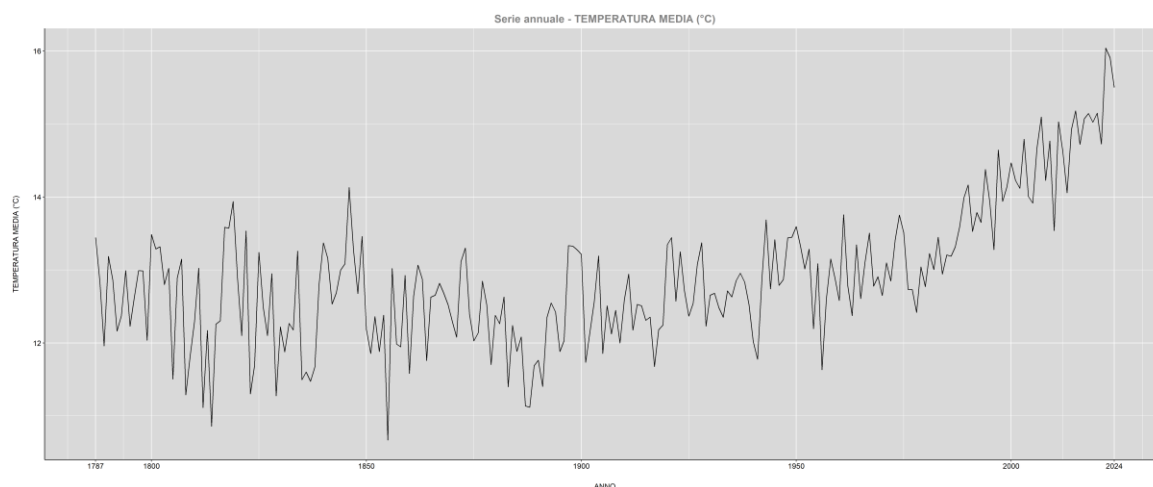


Figura 135. Serie temporale delle temperature medie aggregate annualmente nel periodo analizzato (1787-2024) registrata presso la stazione di Torino Giardini Reali

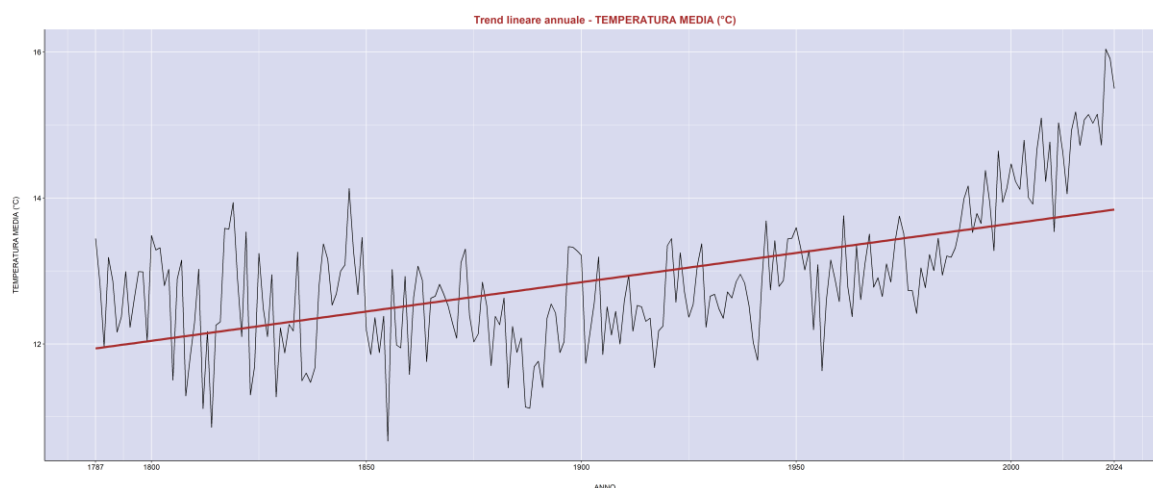


Figura 136. Trend lineare della serie delle temperature medie aggregate annualmente
(Pendenza del trend = 0,008 °C/anno Errore standard = 0,0007)

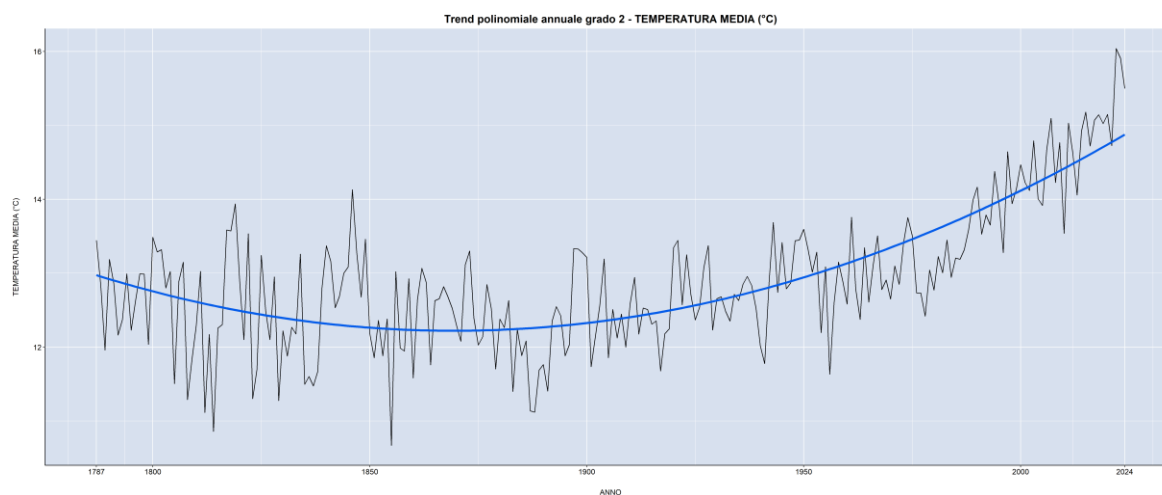


Figura 137. Trend polinomiale di secondo grado della serie delle temperature medie aggregate annualmente

Temperature massime, minime e medie - Autocorrelazione mensile

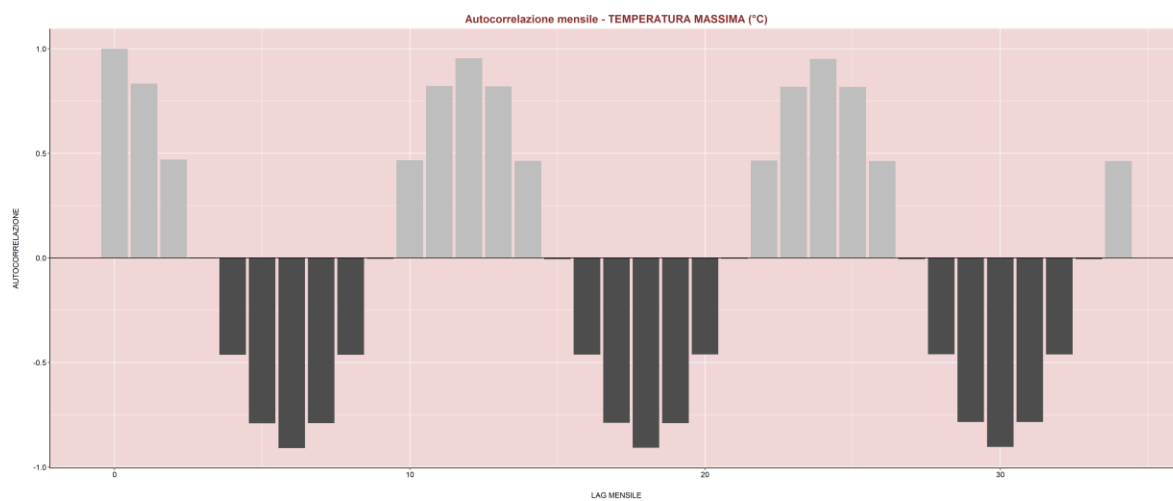


Figura 138. Funzione di autocorrelazione della serie delle temperature massime aggregate mensilmente

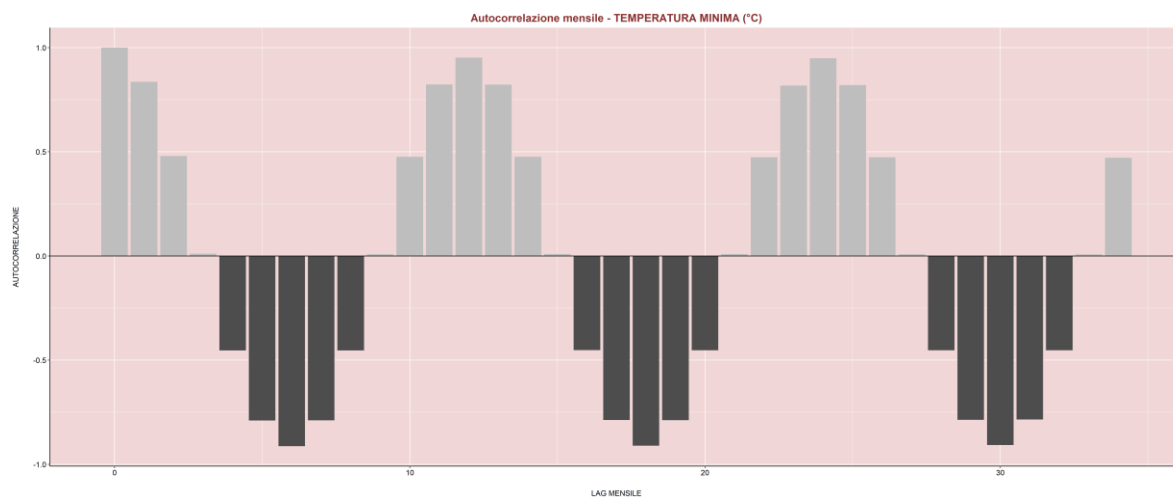


Figura 139. Funzione di autocorrelazione della serie delle temperature minime aggregate mensilmente

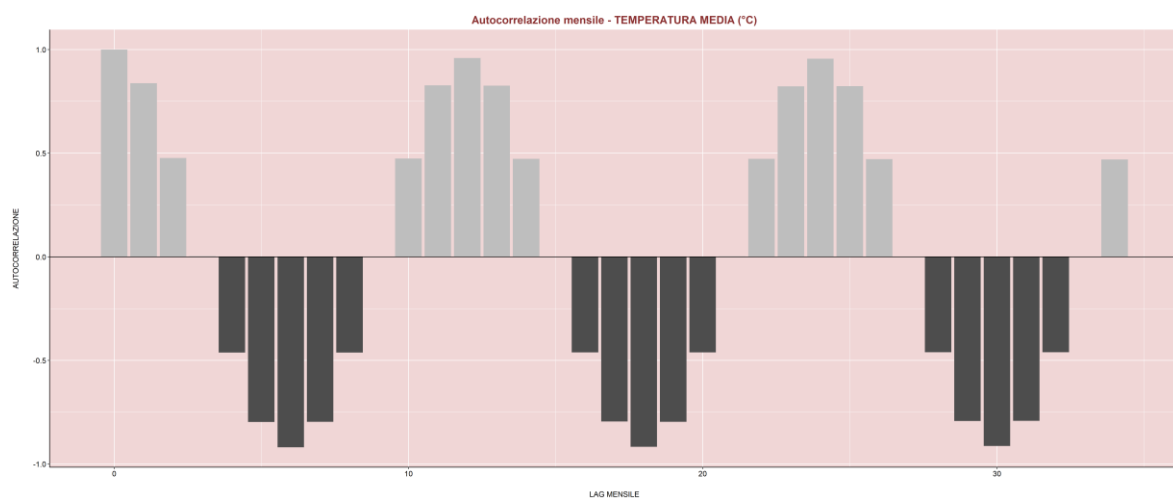


Figura 140. Funzione di autocorrelazione della serie delle temperature medie aggregate mensilmente

Temperature massime, minime e medie - Autocorrelazione annuale

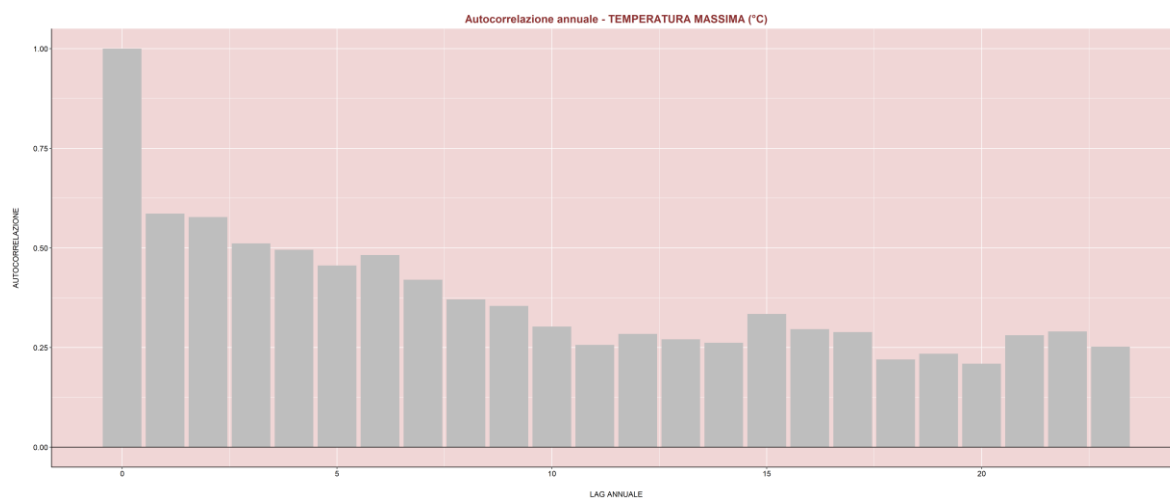


Figura 141. Funzione di autocorrelazione della serie delle temperature massime aggregate annualmente

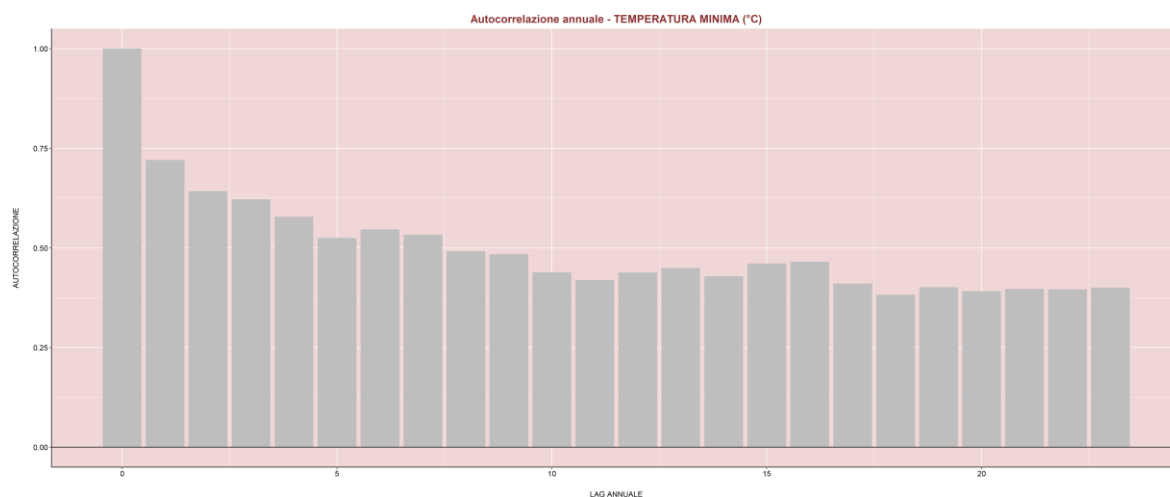


Figura 142. Funzione di autocorrelazione della serie delle temperature minime aggregate annualmente

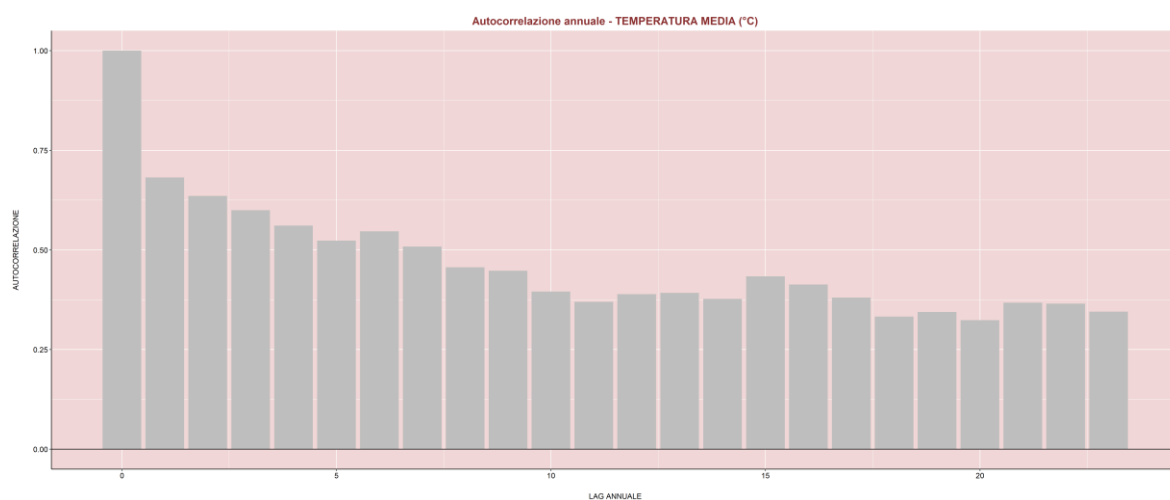


Figura 143. Funzione di autocorrelazione della serie delle temperature medie aggregate annualmente

I dati giornalieri disponibili per la città di Torino documentano un incremento costante del trend lineare, con una pendenza pari a $0,0076\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{anno}$ (errore standard $0,00043$) per le temperature massime, $0,0086\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{anno}$ (errore standard $0,0004$) per le temperature minime e $0,0081\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{anno}$ (con errore standard di $0,0004$) per le temperature medie. Questi valori di pendenza corrispondono ad un aumento di temperatura rispettivamente pari a $0,076\text{ }^{\circ}\text{C}$, $0,086\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $0,081\text{ }^{\circ}\text{C}$ ogni decennio.

Sovrapponendo a questa ampia densità di dati un trend polinomiale di grado 2, si ottiene, per tutte e tre le variabili di temperatura analizzate, una traiettoria che si discosta lievemente dalla pura linearità per definire una morbida curva concava, il cui minimo è riscontrabile in corrispondenza degli anni della “Piccola Era Glaciale”, ovvero quel periodo della storia climatica della Terra che va approssimativamente dalla metà del XIV alla metà del XIX secolo nel quale si registrò un sensibile abbassamento della temperatura media terrestre.

Dopo questo evento storico, i tre trend polinomiali di secondo grado restituiscono un costante aumento delle temperature associato ad un progressivo aumento della ripidezza della curva.

Il filtraggio del rumore statistico, ottenuto attraverso l'aggregazione su scala mensile e annuale, restituisce un quadro evolutivo di eccezionale nitidezza.

A livello annuale, i trend lineari quantificano l'innalzamento in $0,0075\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{anno}$ per le massime (errore standard $0,0008$), in $0,0085\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{anno}$ per le minime (errore standard $0,0008$) e in $0,0080\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{anno}$ per le medie (errore standard $0,0007$).

È proprio nel confronto tra queste cifre che emerge il dato fisicamente più critico per Torino: a differenza di quanto riscontrato nei casi di Roma e Milano, qui si assiste a una sostanziale inversione dell'asimmetria termica, con le temperature minime che crescono a un ritmo addirittura superiore rispetto a quelle massime.

Su scala mensile, i trend lineari restituiscono dei valori di pendenza pari a $0,0077\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{anno}$ (errore standard $0,002$) per le massime, $0,0088\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{anno}$ (errore standard $0,002$) per le minime e $0,0082\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{anno}$ (errore standard $0,002$) per le medie.

Altrettanto interessante risulta il comportamento del trend polinomiale di grado 2 applicato alle serie aggregate. Sul dato mensile, la parabola disegna una fluida traccia concava che presenta le medesime caratteristiche descritte per i trend polinomiali delle serie giornaliere.

Sul dato annuale, invece, modella con rigore le grandi macro-fasi climatiche: la curva evidenzia dapprima gli strascichi della "Piccola Era Glaciale", raggiungendo il proprio vertice inferiore intorno alla metà dell'Ottocento, per poi innescare un lento recupero termico che si trasforma, nell'ultimo mezzo secolo, in una più ripida ascesa verso l'alto. Tale andamento è riscontrabile e coerente nei grafici di tutte e tre le variabili di temperatura analizzate.

L'indagine dei correlogrammi consolida e rafforza l'interpretazione fisica dei risultati. L'autocorrelazione mensile esibisce la rigorosa e attesa alternanza sinusoidale dettata dall'andamento delle stagioni, con massimi e minimi speculari rispettivamente ai lag 12 e 6.

È tuttavia l'autocorrelazione annuale a fornire la misura dell'inerzia termica del sistema torinese. Il decadimento dei valori positivi risulta lentissimo e assai persistente, mantenendosi abbondantemente al di sopra della soglia dello zero anche oltre i 20-24 lag di distanza. Questa marcata persistenza statistica dimostra come le anomalie climatiche locali non si esauriscano nel breve periodo; al contrario, tendono a conservarsi e ad accumularsi di decennio in decennio.

Torino Giardini Reali	Pendenze Temperature massime [°C/anno ± errore standard]	Pendenze Temperature minime [°C/anno ± errore standard]	Pendenze Temperature medie [°C/anno ± errore standard]
Serie giornaliera	0,008 ± 0,0004	0,009 ± 0,0004	0,008 ± 0,0004
Serie mensili	0,008 ± 0,002	0,009 ± 0,002	0,008 ± 0,002
Serie annuali	0,008 ± 0,0008	0,009 ± 0,0008	0,008 ± 0,0007

Tabella 8. Tabella riassuntiva delle pendenze dei trend lineari ottenute per la stazione di Torino Giardini Reali

Palermo -Palermo Osservatorio Astronomico

L'osservatorio astronomico della città di Palermo venne fondato nel 1790 per volontà di Ferdinando I di Borbone che, spinto da alcuni intellettuali del tempo, decise di dotare la capitale del suo regno, il regno di Sicilia, di un elemento di prestigio al pari delle altre capitali europee. Grazie all'audacia del suo primo direttore, Giuseppe Piazzi, e grazie all'acquisto di preziosi strumenti di ricerca, l'osservatorio fu, per molti anni, un centro di ricerca d'avanguardia in Italia ed in Europa.

L'osservatorio vanta serie climatiche ultracentenarie che non è stato tuttavia possibile reperire ed utilizzare in questo progetto di ricerca perché non disponibili in formato digitale e sui portali SCIA ISPRA.

Analogamente a quanto successo per i dati registrati dalla stazione di Napoli Capodichino, le serie giornaliere raccolte dall'Osservatorio Astronomico di Palermo, presentavano alcune lacune. Per ovviare a questa criticità si è deciso di procedere, anche in questo caso, indagando le discontinuità presenti ed accorciando la serie di partenza per ottenere una serie più corta ma continua, maggiormente adatta, all'analisi dei trend.

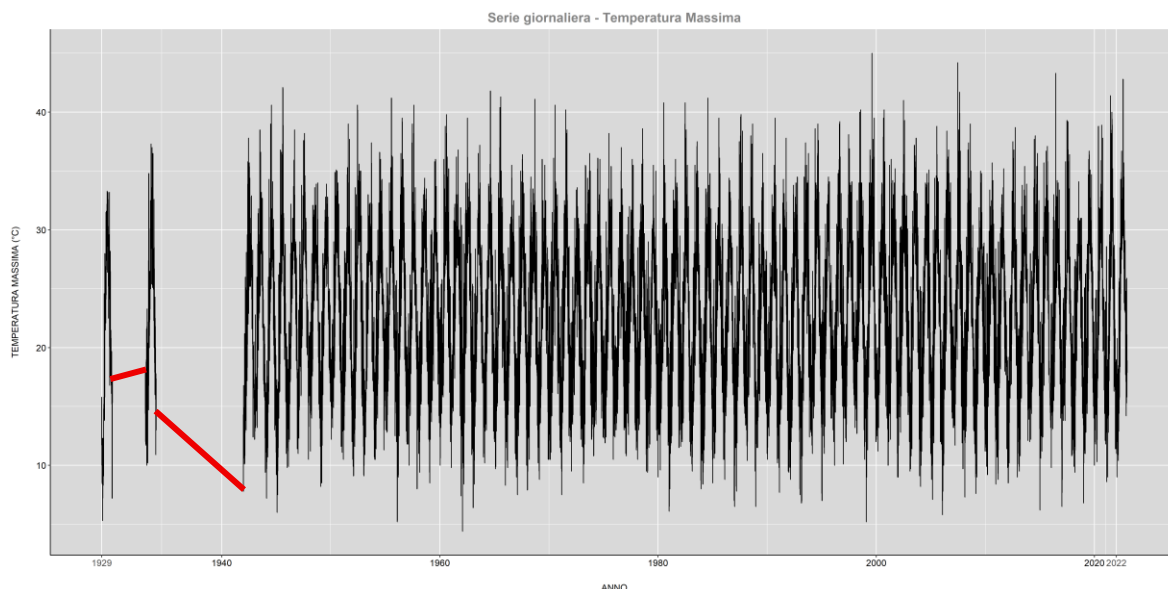


Figura 144. Serie giornaliera relativa alla temperatura massima registrata presso la stazione di Palermo Osservatorio Astronomico con indicate, in rosso, le discontinuità più lunghe

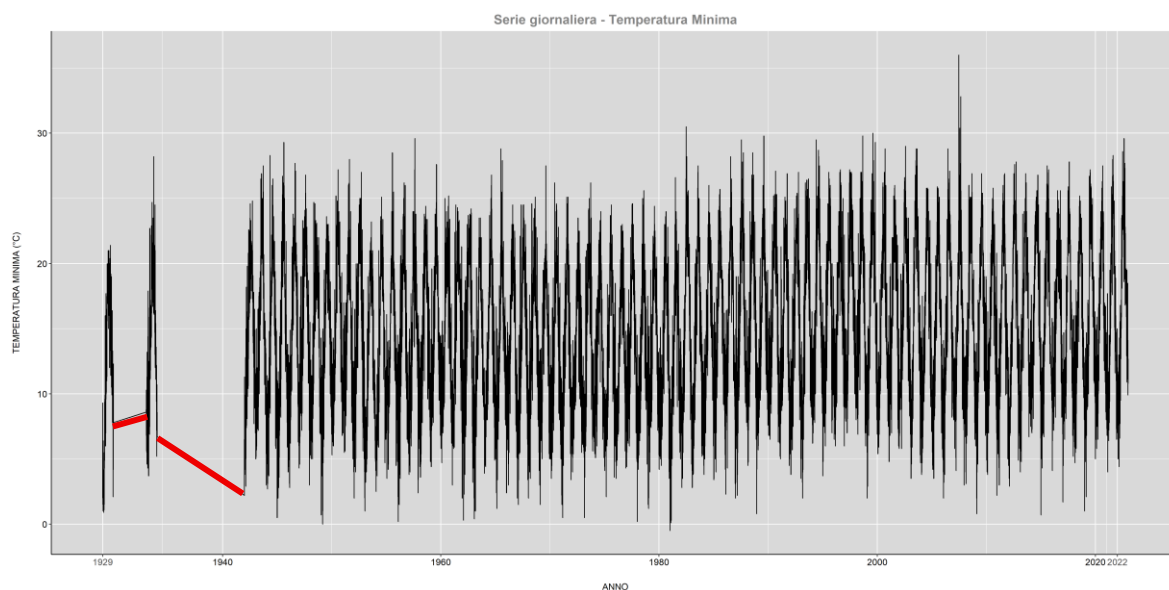


Figura 145. Serie giornaliera relativa alla temperatura minima registrata presso la stazione di Palermo Osservatorio Astronomico con indicate, in rosso, le discontinuità più lunghe

Nella tabella che segue vengono riassunti i risultati emersi dall'analisi delle lacune ottenuta dalla medesima funzione aggiuntiva di RStudio utilizzata per lo studio delle serie della stazione di Napoli Capodichino.

Numero di giorni mancanti	Anno	Anno completamente assente		Anno mancante per più del 50%	
		1°	1930	/	/
366	1932, 1936, 1940	2°	1931		
365	1930, 1931, 1934, 1935, 1937, 1938, 1939, 1941	3°	1932		
60	2015	4°	1934		
5	1929	5°	1935		
1	2016	6°	1936		
		7°	1937		
		8°	1938		
		9°	1939		
		10°	1940		
		11°	1941		

Tabella 9. Risultati dell'analisi sul numero di giorni mancanti nelle serie giornaliere relative alla temperatura massima e minima registrata presso la stazione di Napoli Capodichino con indicati, in grigio, gli anni che presentano più della metà dei giorni mancanti

La maggior parte dei dati mancanti è concentrata prima del 1942, anno successivo alla quale mancano alcune giornate, in particolare per l'anno 2015. Le serie di dati di partenza, che vanno dal 1929 al 2022, sono state accorciate, ottenendo delle serie di lunghezza pari ad 80 anni (1942-2022), sufficientemente continue.

Temperature massime - Serie giornaliera e trend

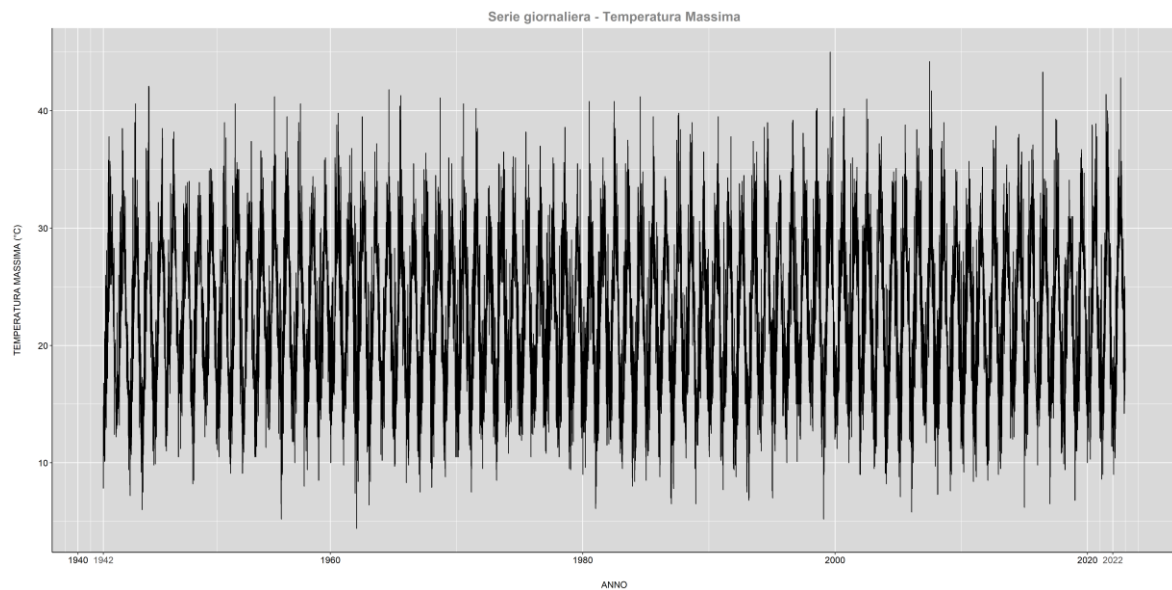


Figura 146. Serie temporale della temperatura massima giornaliera nel periodo analizzato (1942-2022) registrata presso la stazione di Palermo Osservatorio Astronomico

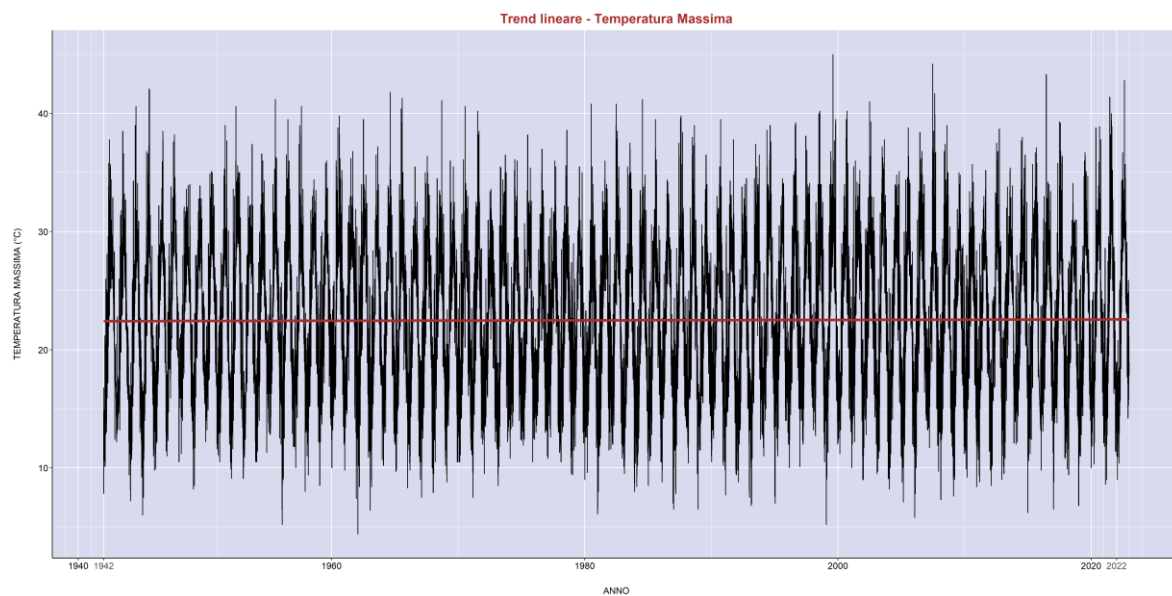


Figura 147. Trend lineare della serie delle temperature massime giornaliere (Pendenza del trend = 0,002 °C/anno Errore standard = 0,002)

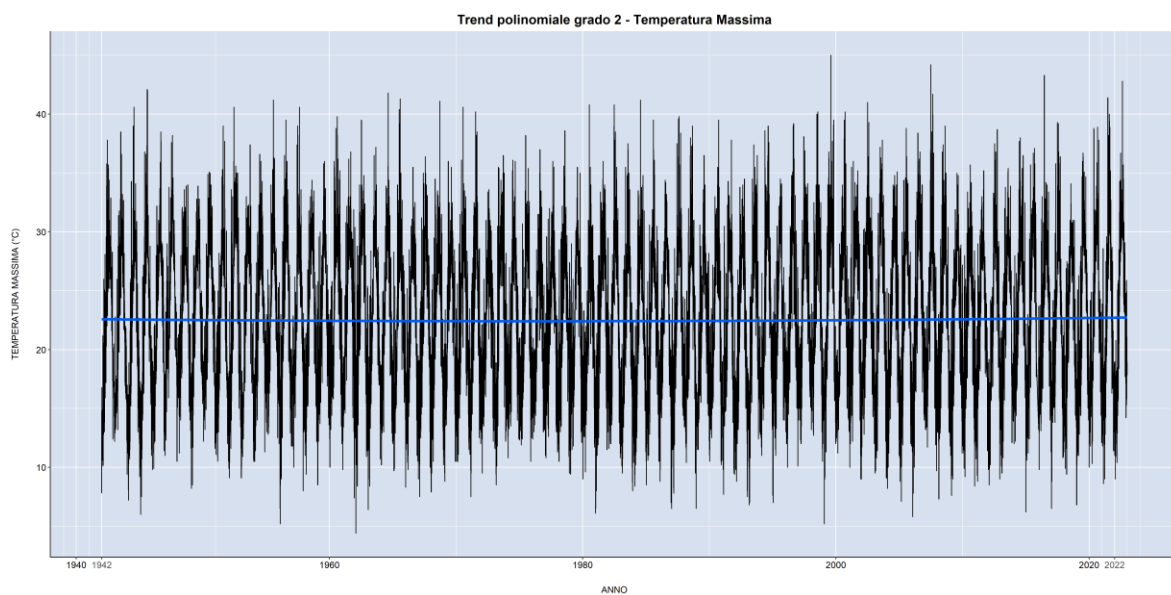


Figura 148. Trend polinomiale di secondo grado della serie delle temperature massime giornaliere

Temperature minime - Serie giornaliera e trend

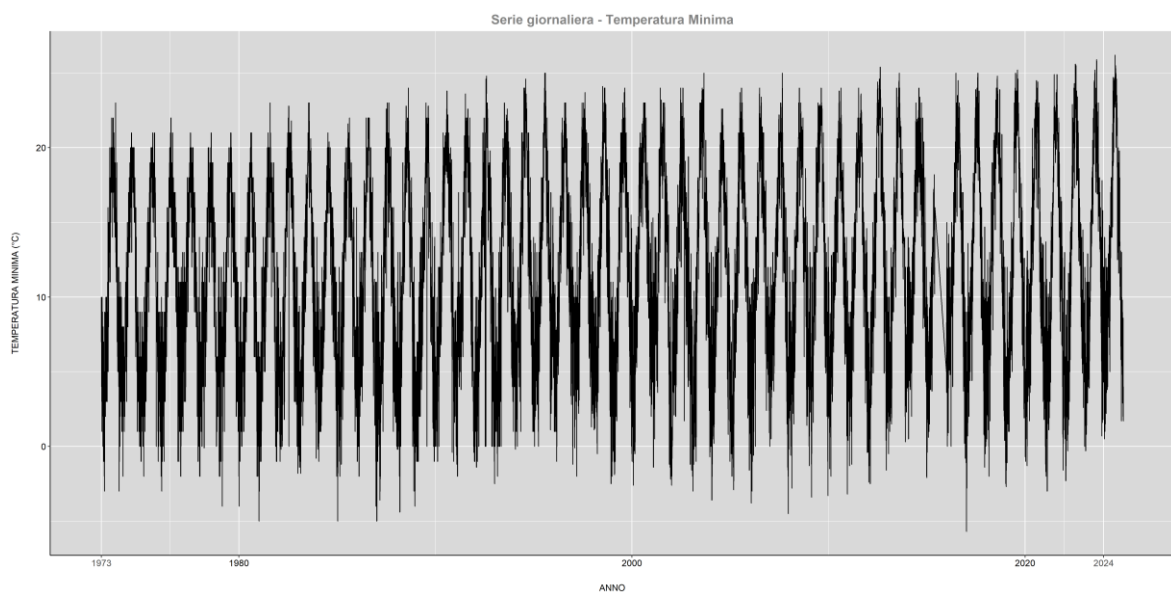


Figura 149. Serie temporale della temperatura minima giornaliera nel periodo analizzato (1942-2022) registrata presso la stazione di Palermo Osservatorio Astronomico

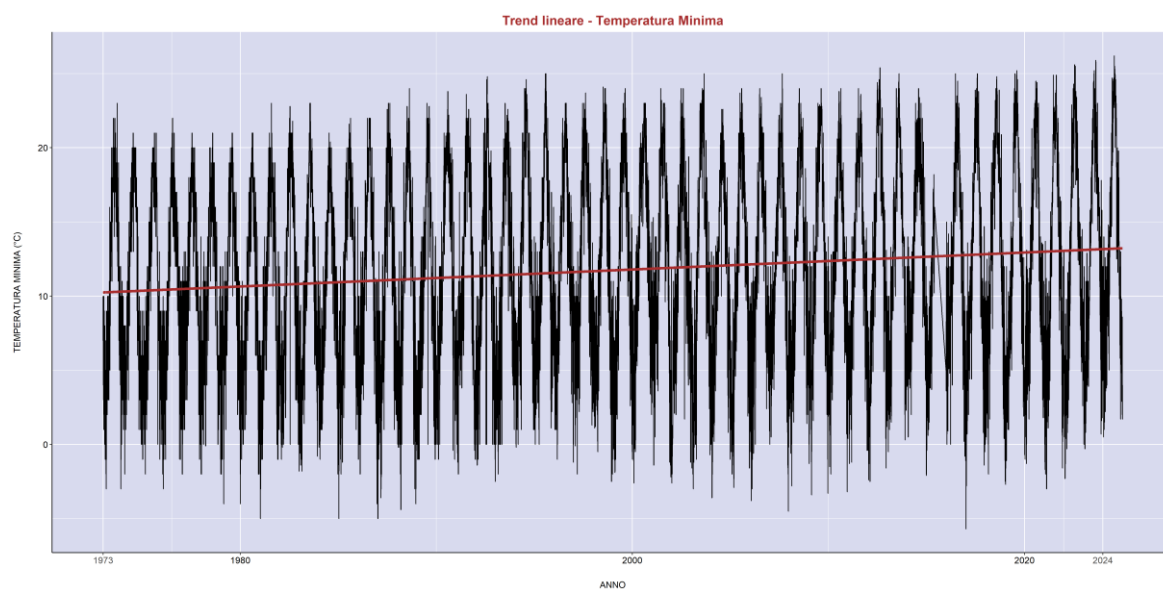


Figura 150. Trend lineare della serie delle temperature minime giornaliere
(Pendenza del trend = $0,03\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{anno}$ Errore standard = $0,001$)

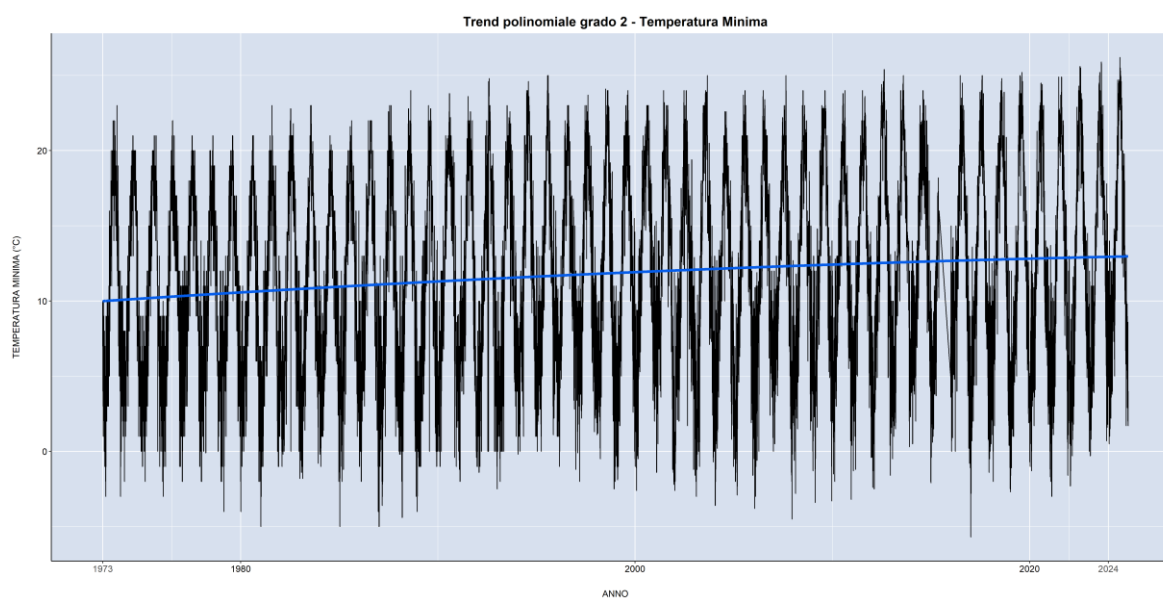


Figura 151. Trend polinomiale di secondo grado della serie delle temperature minime giornaliere

Temperature medie - Serie giornaliera e trend

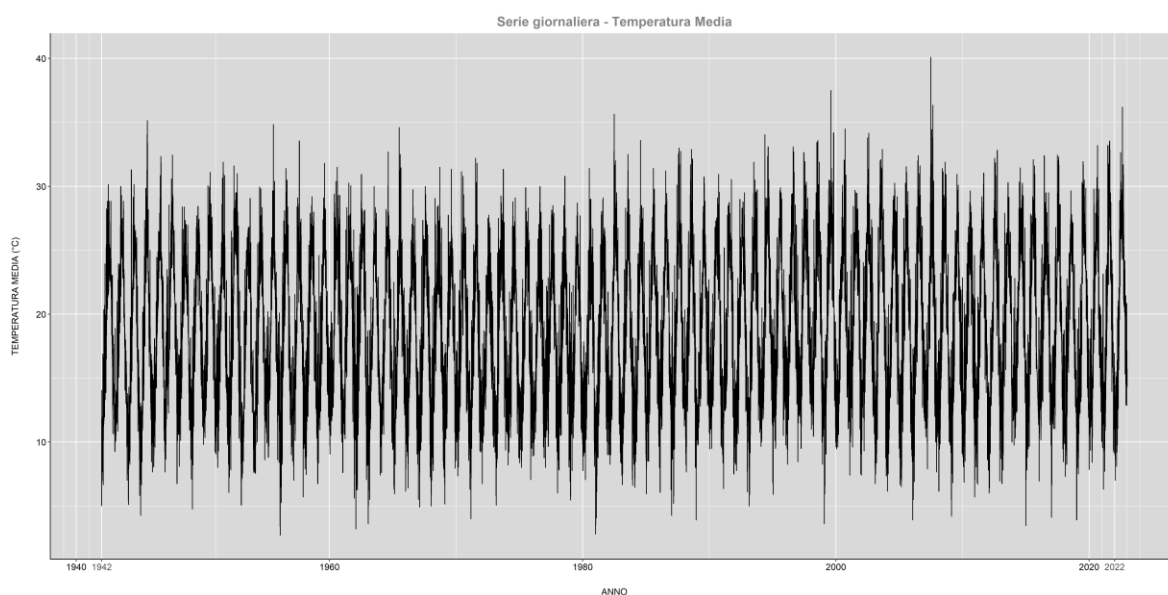


Figura 152. Serie temporale della temperatura media giornaliera nel periodo analizzato (1942-2022) registrata presso la stazione di Palermo Osservatorio Astronomico

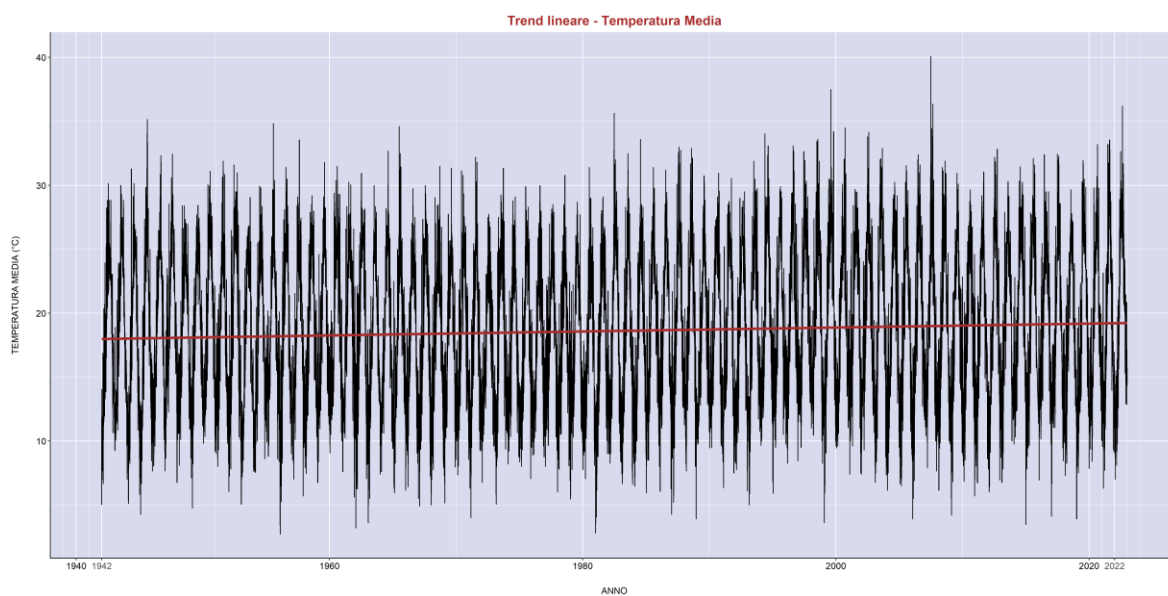


Figura 153. Trend lineare della serie delle temperature medie giornaliere
(Pendenza del trend = $0,02 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{anno}$ Errore standard = $0,001$)

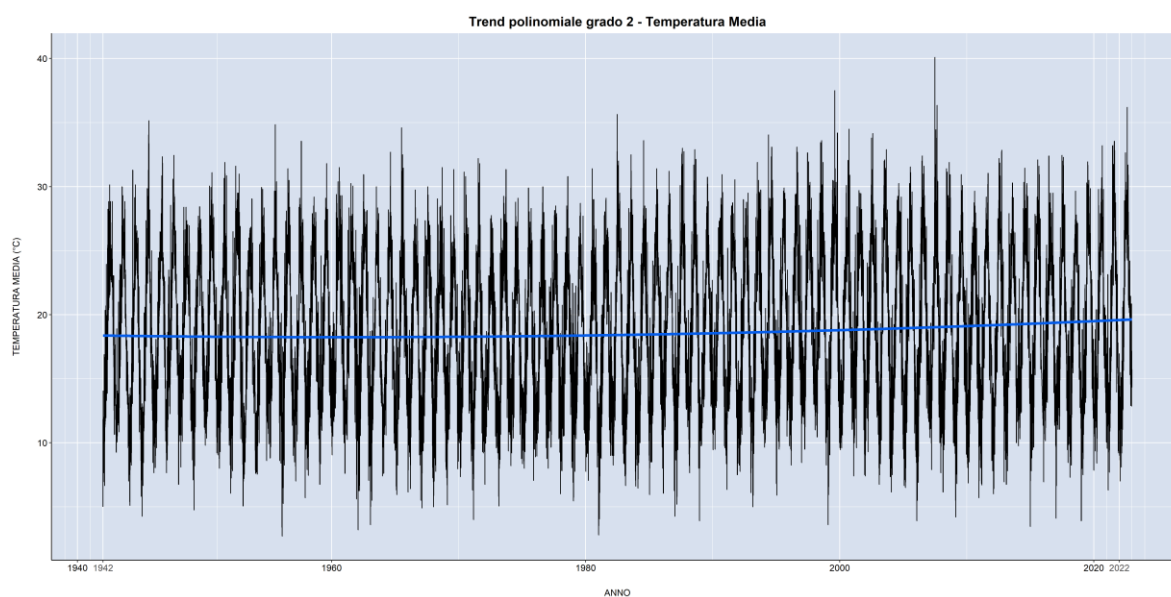


Figura 154. Trend polinomiale di secondo grado della serie delle temperature medie giornaliere

Temperature massime - Serie mensile e trend

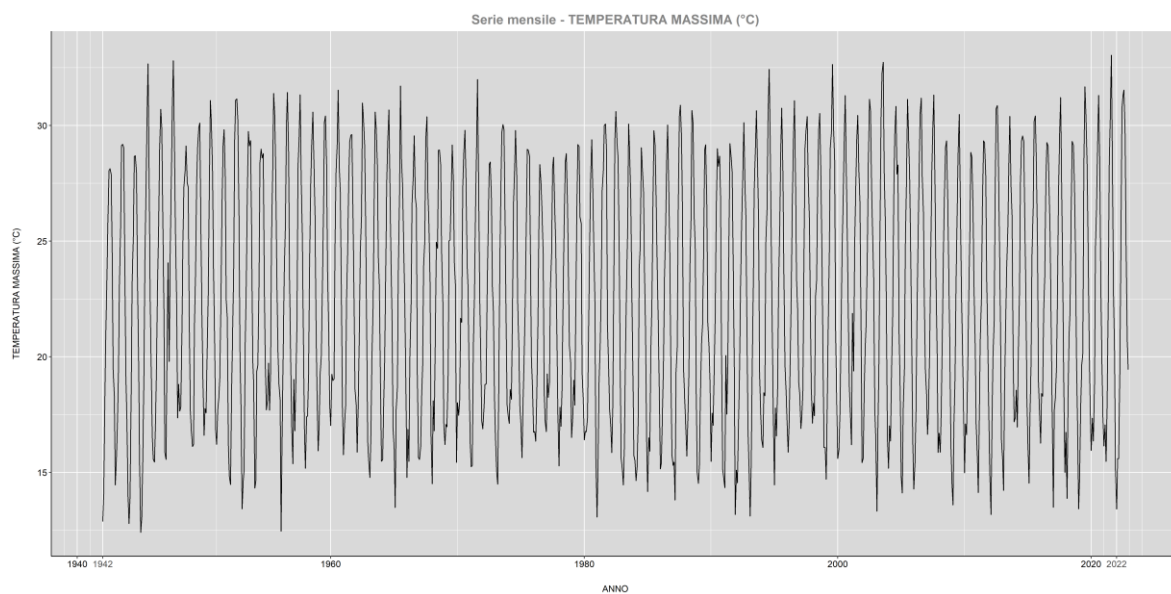


Figura 155. Serie temporale delle temperature massime aggregate mensilmente nel periodo analizzato (1942-2022) registrata presso la stazione di Palermo Osservatorio Astronomico

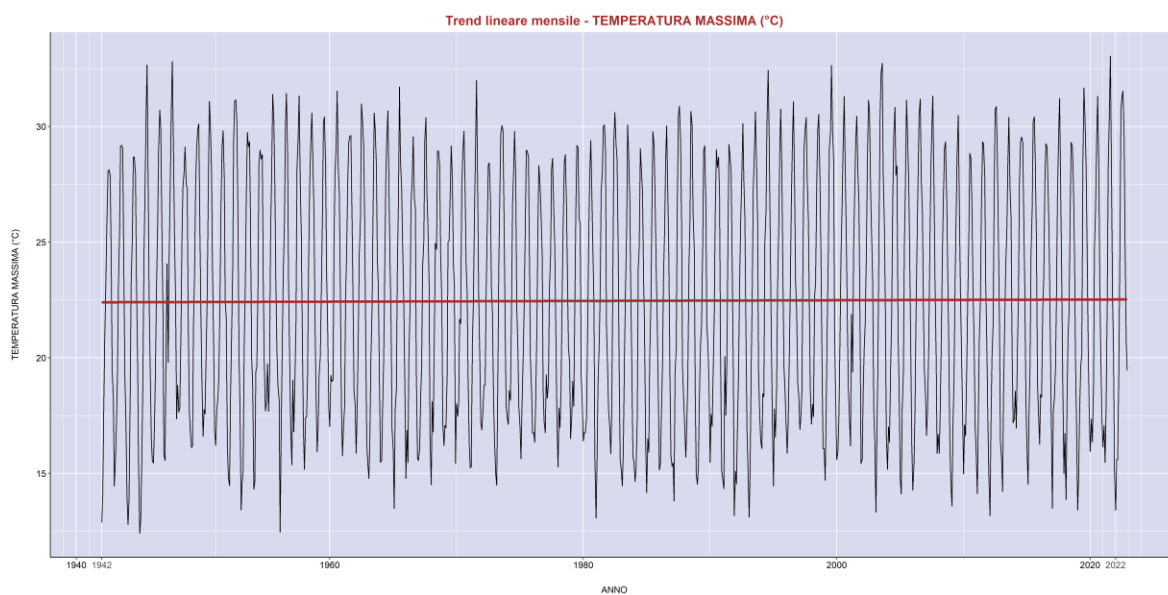


Figura 156. Trend lineare della serie delle temperature massime aggregate mensilmente
(Pendenza del trend = 0,002 °C/anno Errore standard = 0,007)

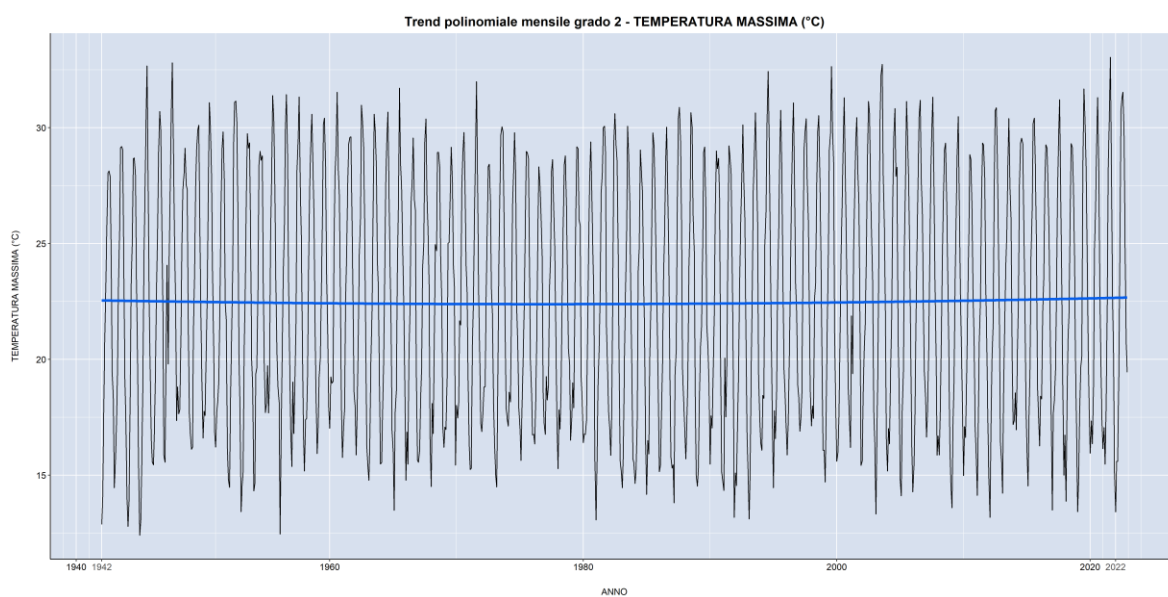


Figura 157. Trend polinomiale di secondo grado della serie delle temperature massime aggregate mensilmente

Temperature minime - Serie mensile e trend

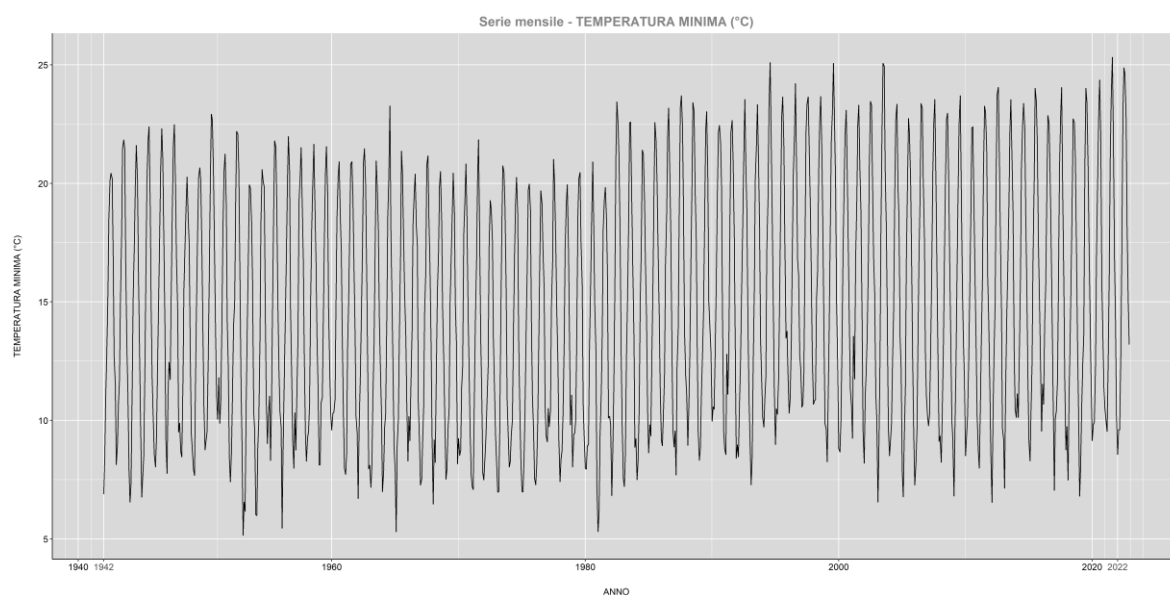


Figura 158. Serie temporale delle temperature minime aggregate mensilmente nel periodo analizzato (1942-2022) registrata presso la stazione di Palermo Osservatorio Astronomico

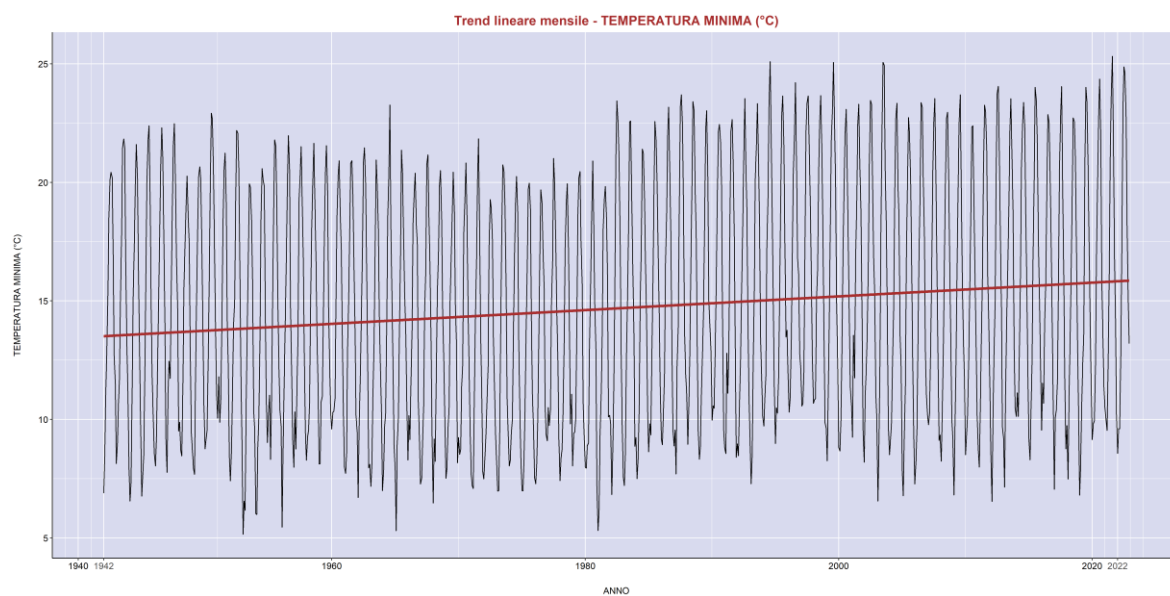


Figura 159. Trend lineare della serie delle temperature minime aggregate mensilmente
(Pendenza del trend = $0,03\text{ }^{\circ}\text{C/anno}$ Errore standard = $0,007$)

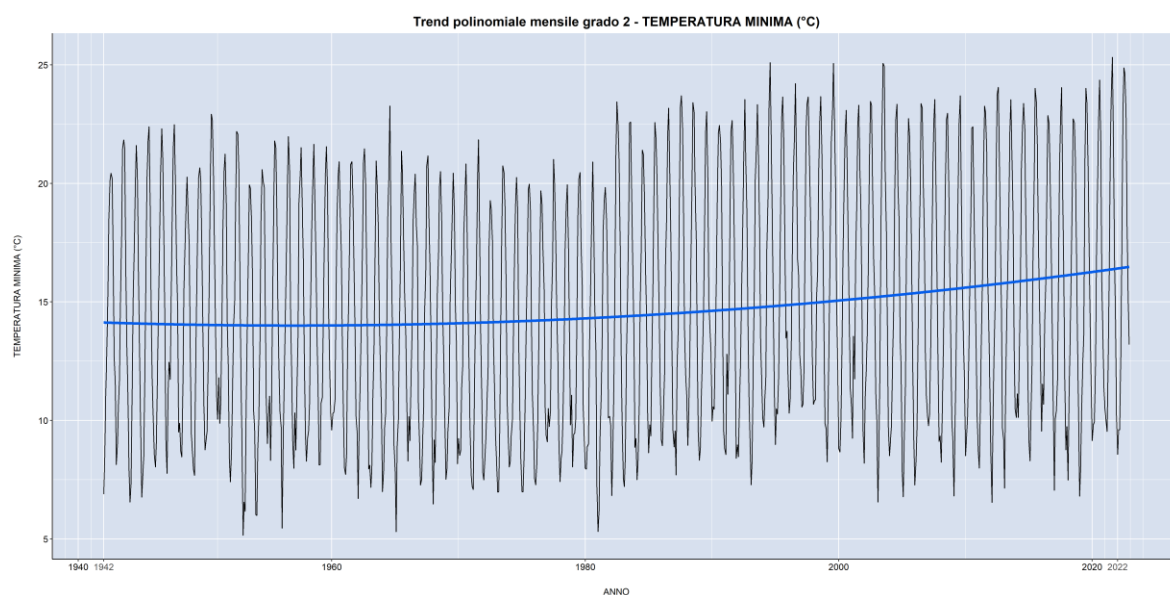


Figura 160. Trend polinomiale di secondo grado della serie delle temperature minime aggregate mensilmente

Temperature medie - Serie mensile e trend

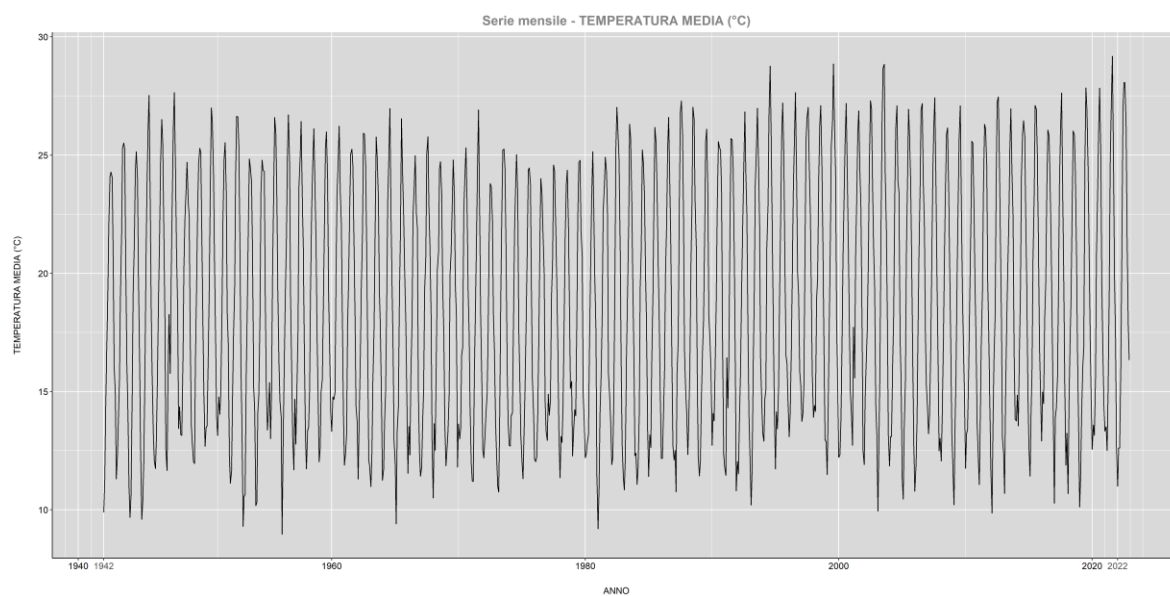


Figura 161. Serie temporale delle temperature medie aggregate mensilmente nel periodo analizzato (1942-2022) registrata presso la stazione di Palermo Osservatorio Astronomico

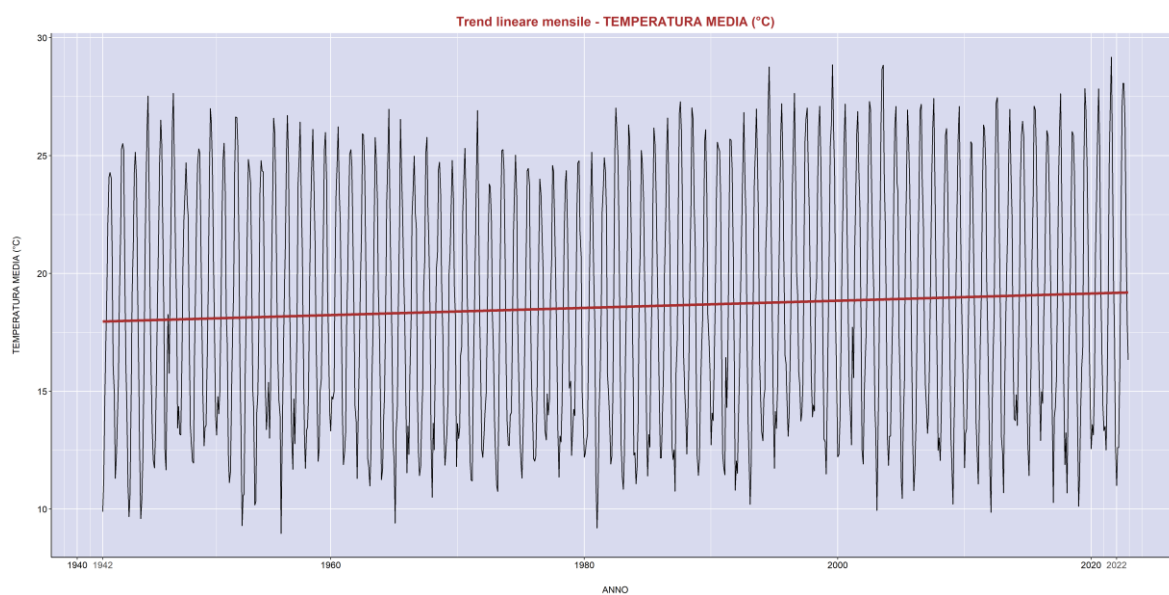


Figura 162. Trend lineare della serie delle temperature medie aggregate mensilmente
(Pendenza del trend = 0,02 °C/anno Errore standard = 0,007)

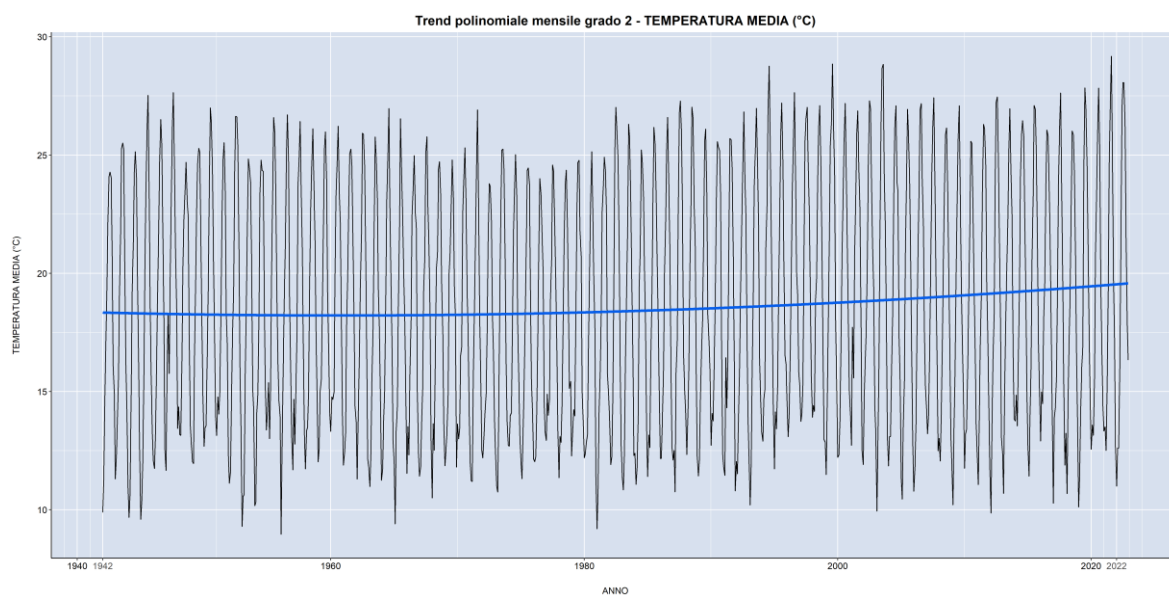


Figura 163. Trend polinomiale di secondo grado della serie delle temperature medie aggregate mensilmente

Temperature massime - Serie annuale e trend

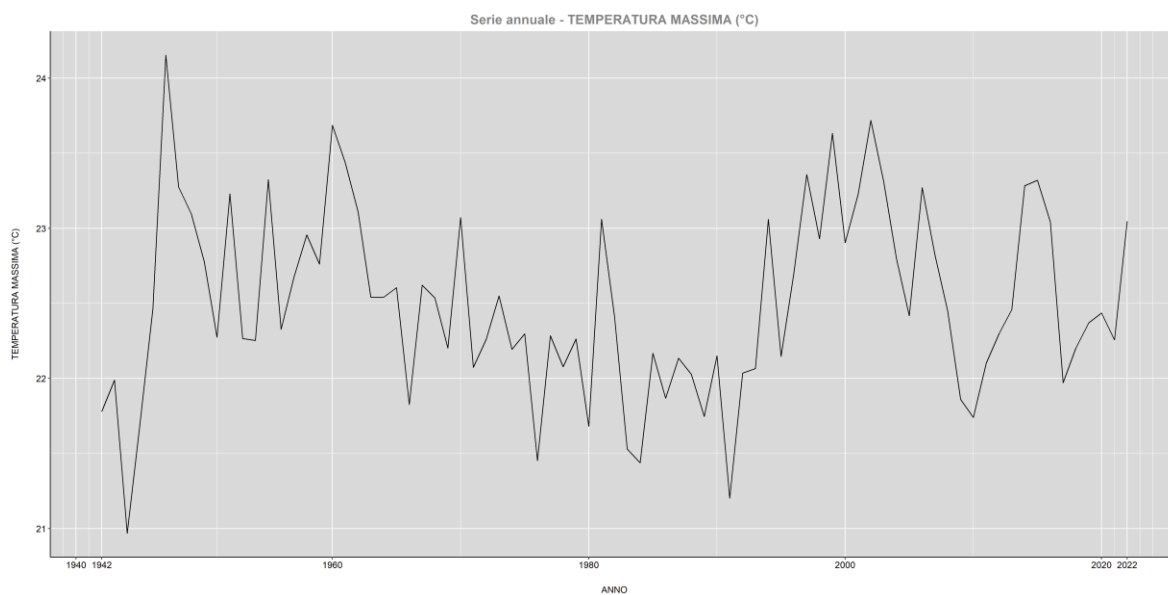


Figura 164. Serie temporale delle temperature massime aggregate annualmente nel periodo analizzato (1942-2022) registrata presso la stazione di Palermo Osservatorio Astronomico

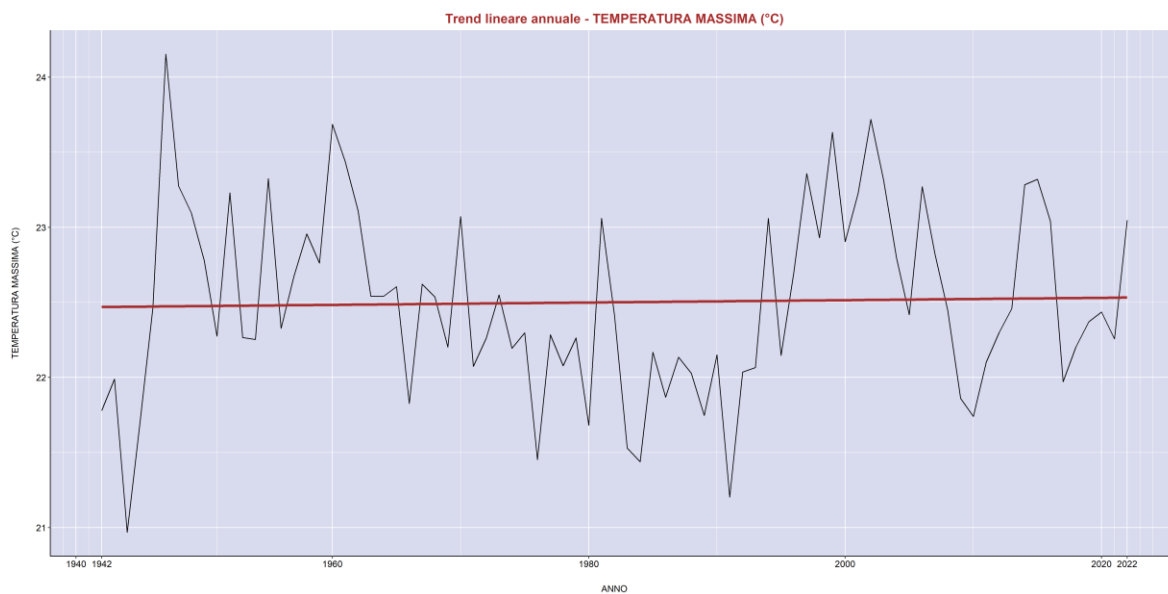


Figura 165. Trend lineare della serie delle temperature massime aggregate annualmente
(Pendenza del trend = 0,0008 °C/anno Errore standard = 0,003)

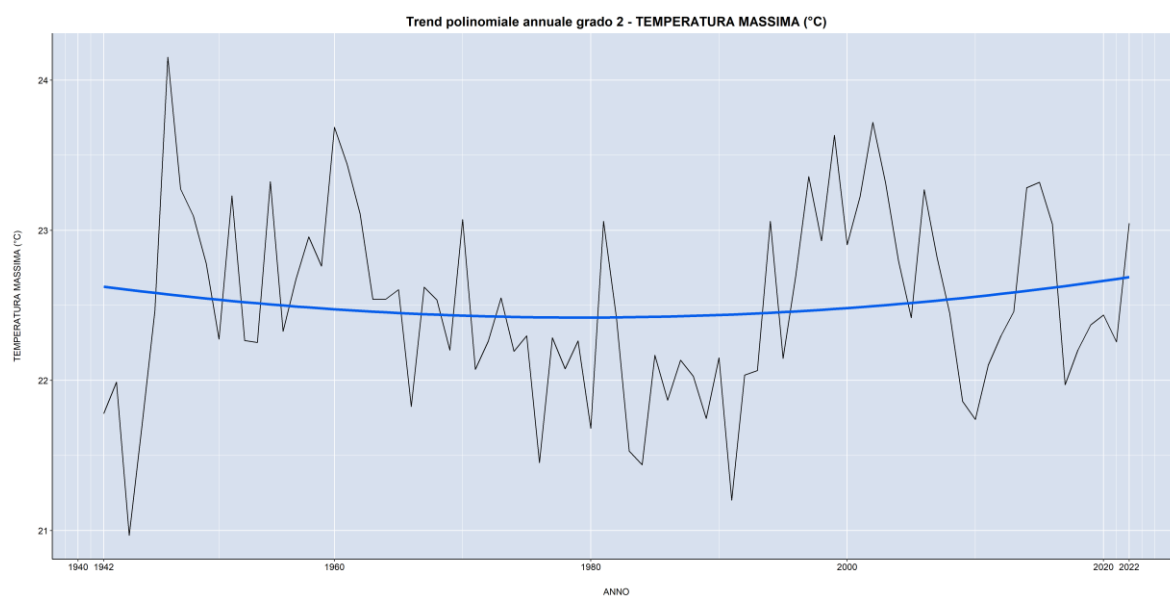


Figura 166. Trend polinomiale di secondo grado della serie delle temperature massime aggregate annualmente

Temperature minime - Serie annuale e trend

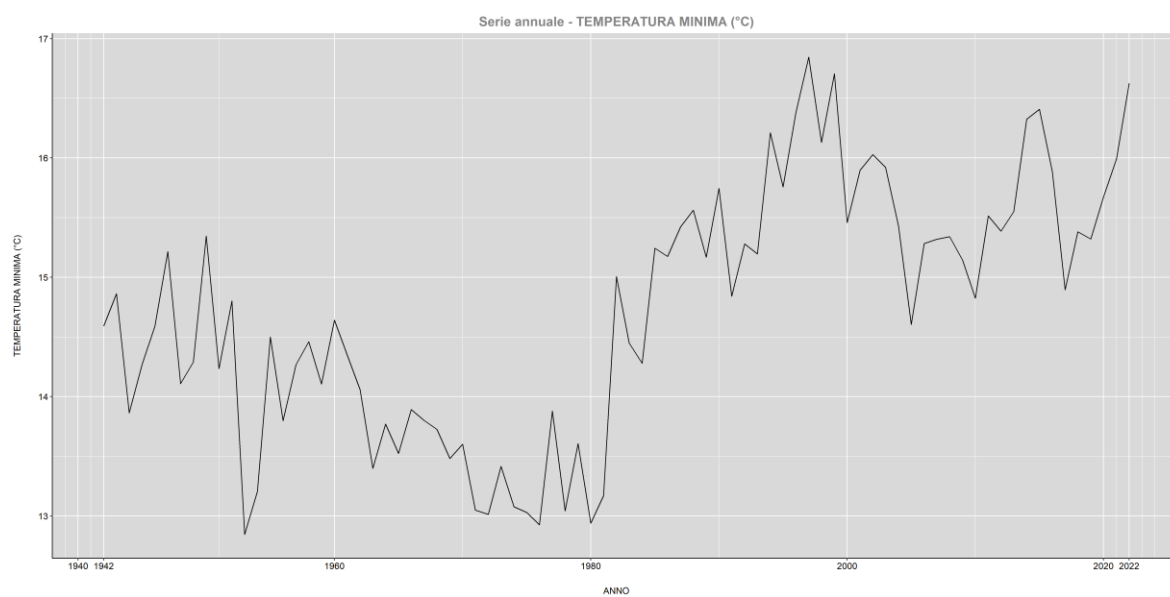


Figura 167. Serie temporale delle temperature minime aggregate annualmente nel periodo analizzato (1942-2022) registrata presso la stazione di Palermo Osservatorio Astronomico

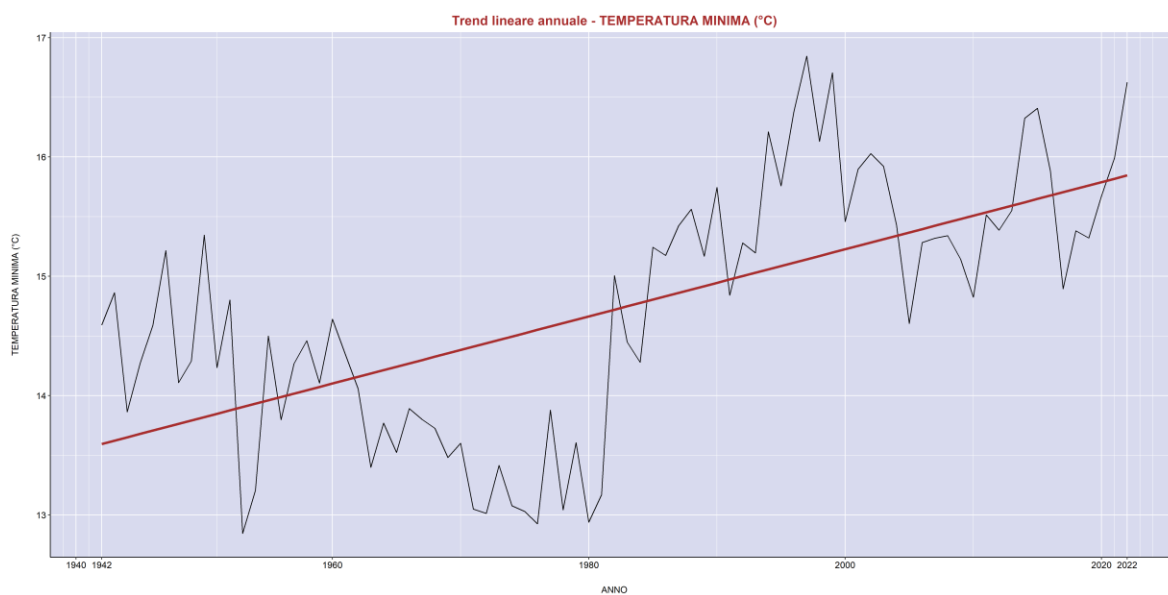


Figura 168. Trend lineare della serie delle temperature minime aggregate annualmente
(Pendenza del trend = $0,03\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{anno}$ Errore standard = $0,004$)

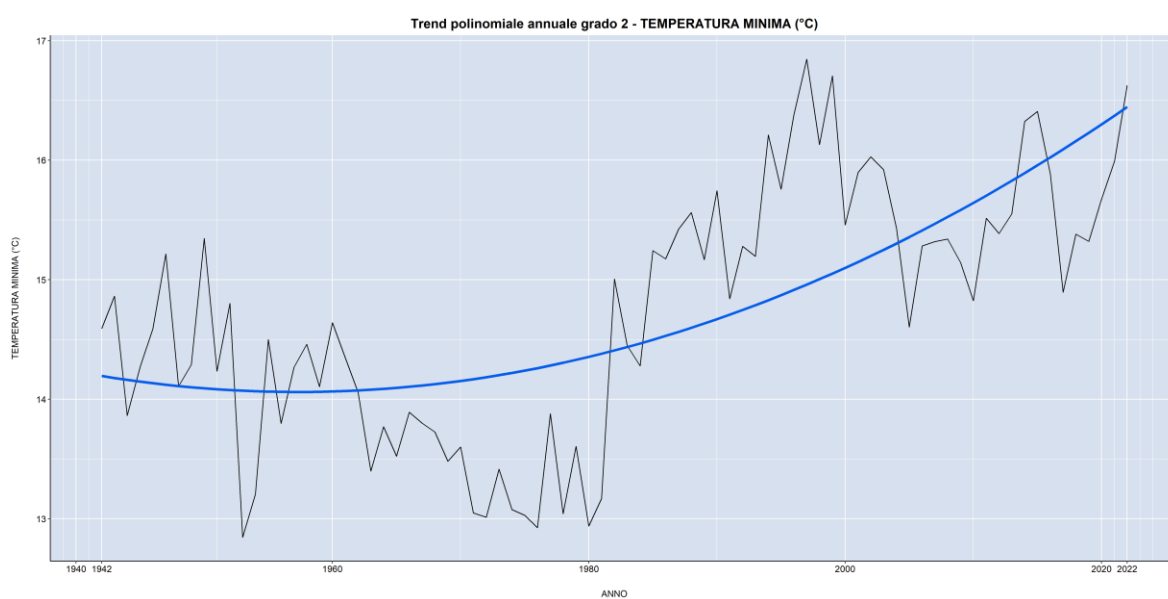


Figura 169. Trend polinomiale di secondo grado della serie delle temperature minime aggregate annualmente

Temperature medie - Serie annuale e trend

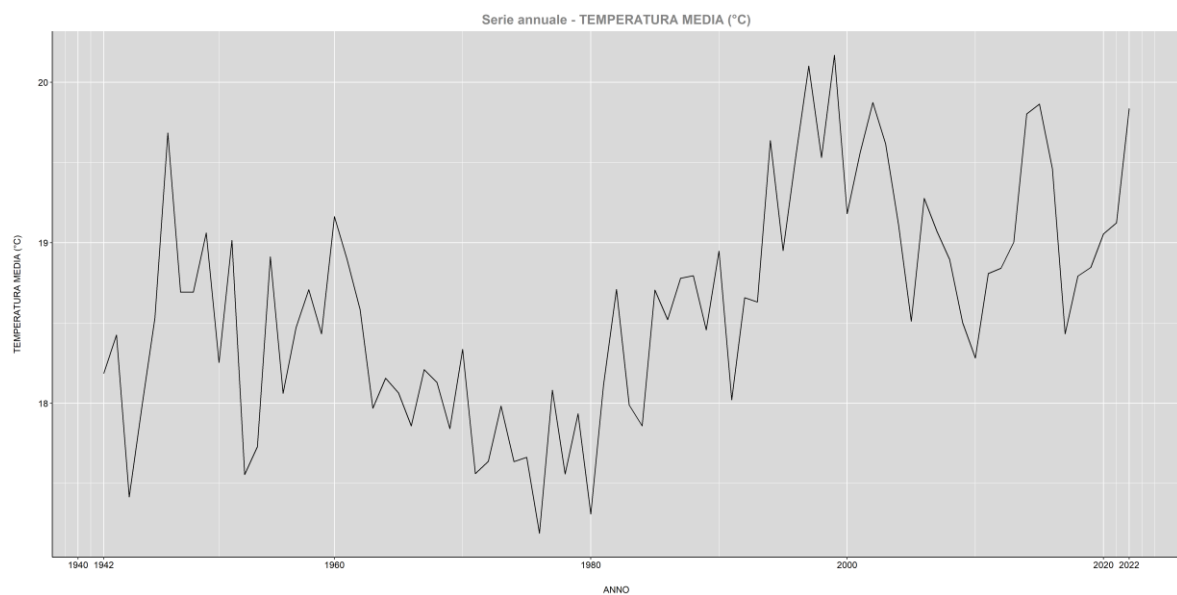


Figura 170. Serie temporale delle temperature medie aggregate annualmente nel periodo analizzato (1942-2022) registrata presso la stazione di Palermo Osservatorio Astronomico

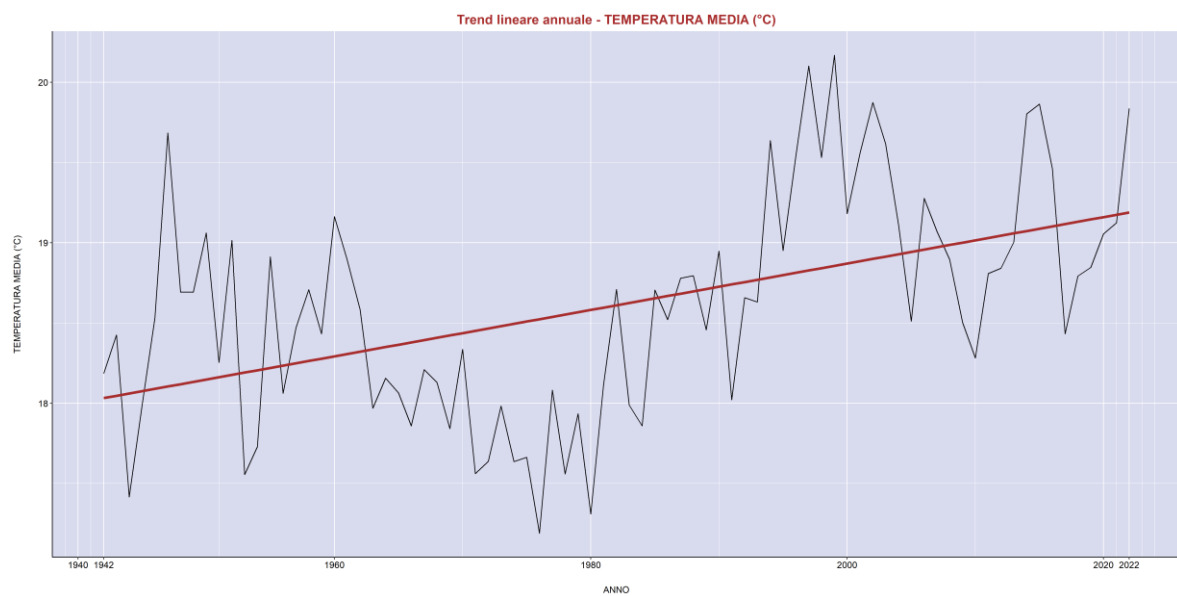


Figura 171. Trend lineare della serie delle temperature medie aggregate annualmente
(Pendenza del trend = 0,02 °C/anno Errore standard = 0,003)

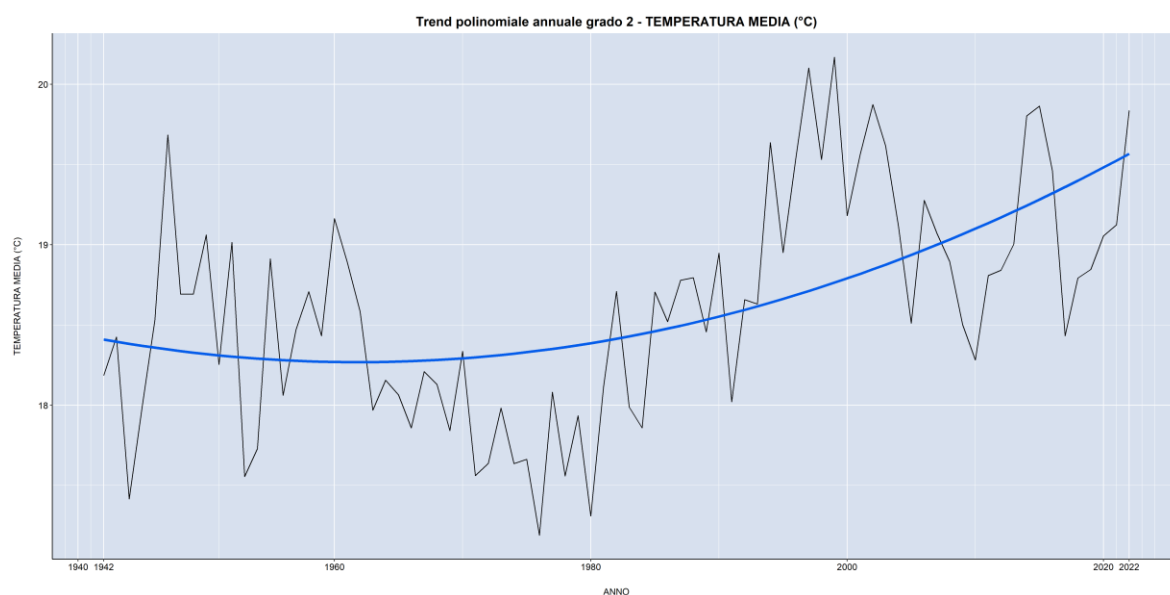


Figura 172. Trend polinomiale di secondo grado della serie delle temperature medie aggregate annualmente

Temperature massime, minime e medie - Autocorrelazione mensile

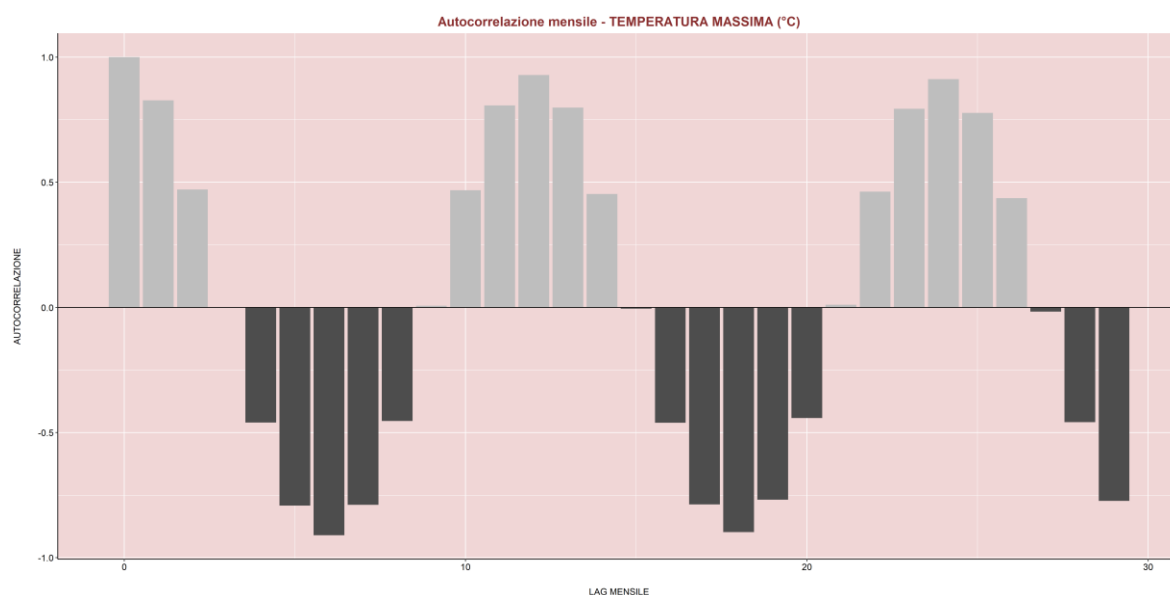


Figura 173. Funzione di autocorrelazione della serie delle temperature massime aggregate mensilmente

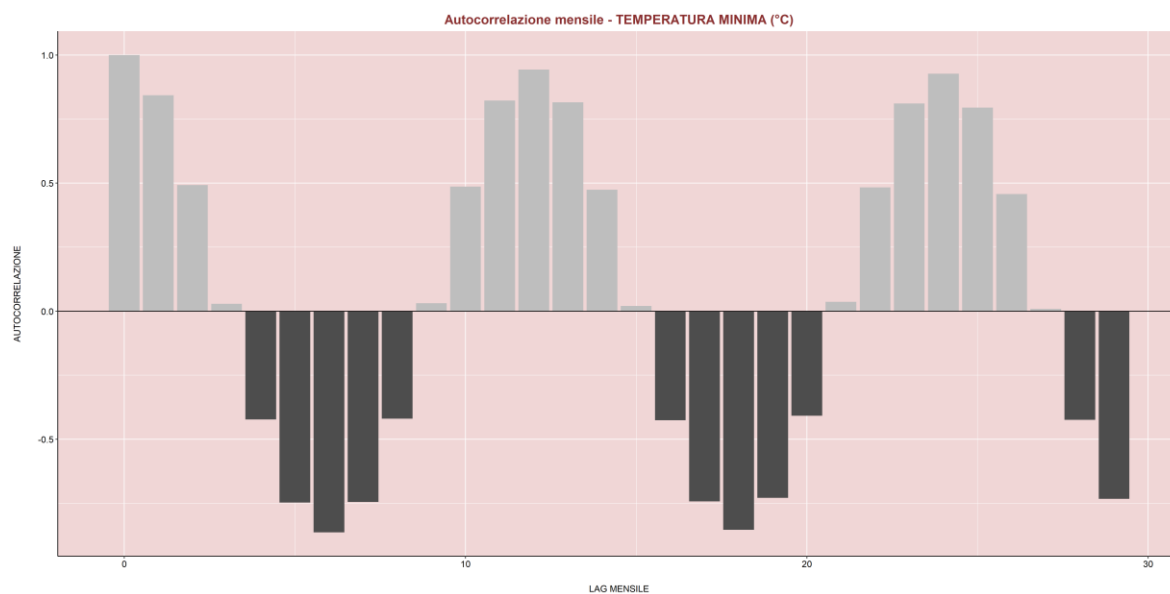


Figura 174. Funzione di autocorrelazione della serie delle temperature minime aggregate mensilmente

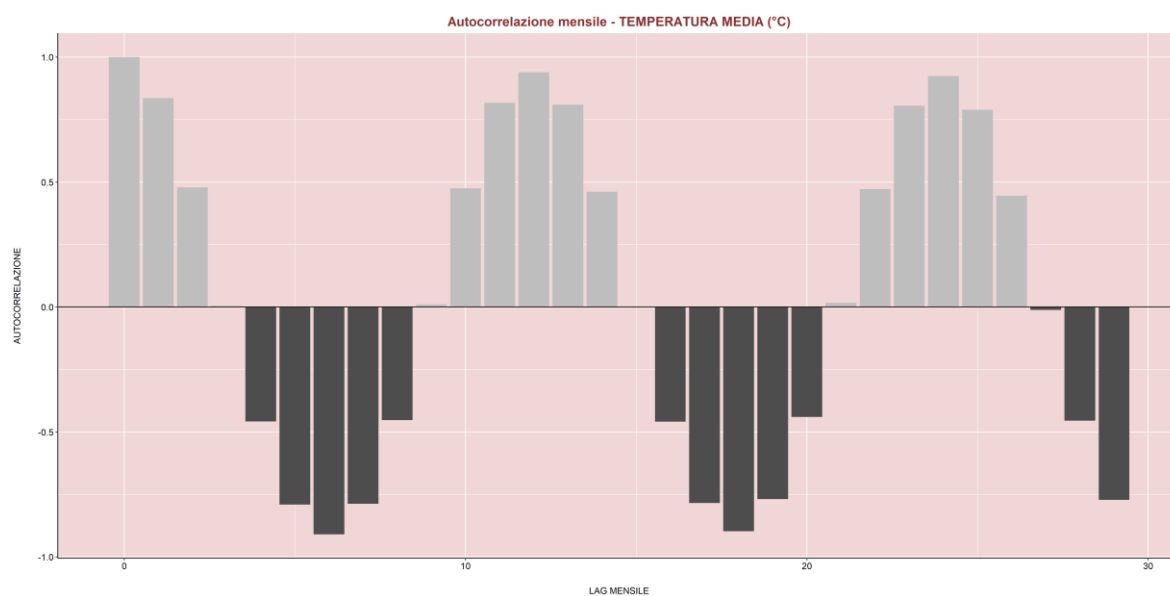


Figura 175. Funzione di autocorrelazione della serie delle temperature medie aggregate mensilmente

Temperature massime, minime e medie - Autocorrelazione annuale

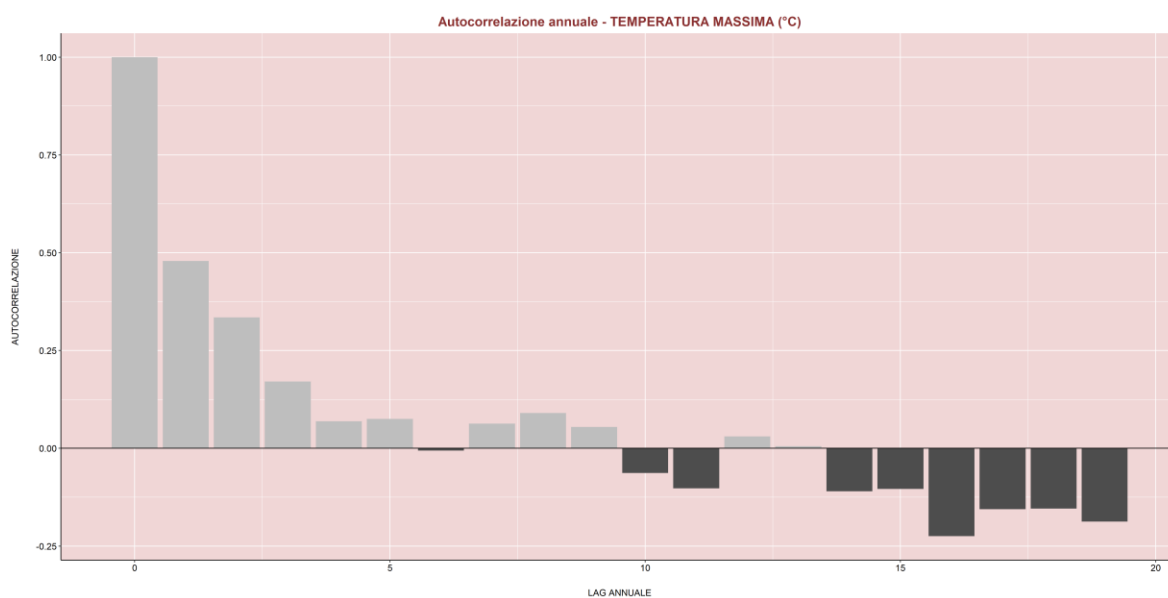


Figura 176. Funzione di autocorrelazione della serie delle temperature massime aggregate annualmente

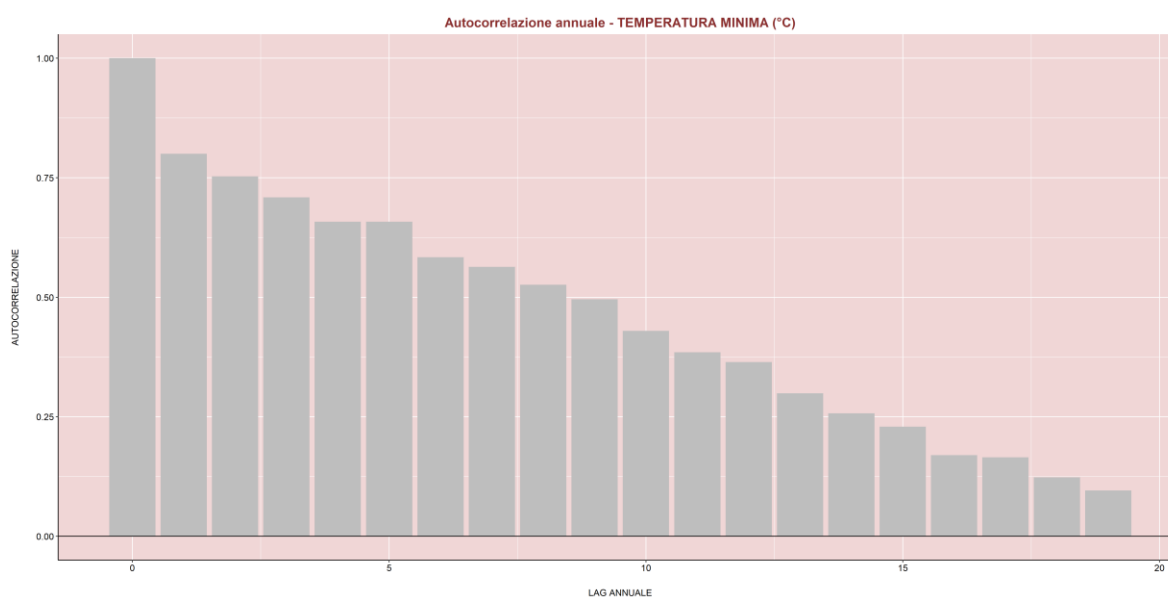


Figura 177. Funzione di autocorrelazione della serie delle temperature minime aggregate annualmente

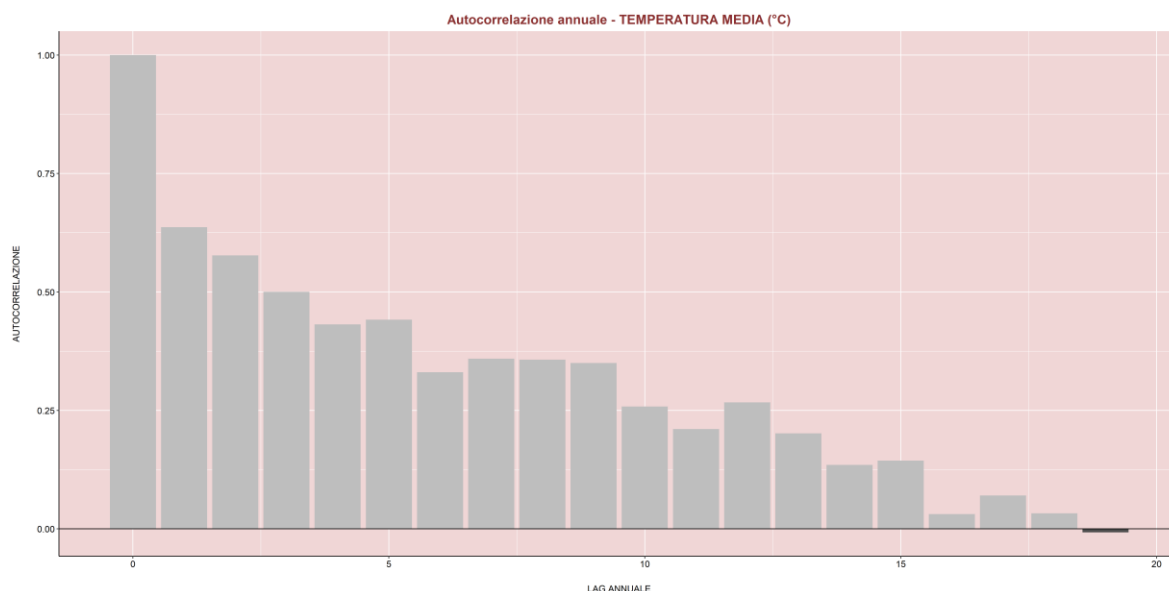


Figura 178. Funzione di autocorrelazione della serie delle temperature medie aggregate annualmente

L'analisi dell'evoluzione climatica della città di Palermo chiude il perimetro della nostra indagine rivelando ulteriori dinamiche termiche urbane.

L'osservazione delle fitte serie temporali giornaliere, dominate, come di consueto, dall'alta frequenza del ciclo stagionale, permette di isolare la primaria traccia del riscaldamento di fondo attraverso l'applicazione del modello lineare. Alla scala giornaliera, infatti, si registra un incremento costante, con una pendenza pari a soli $0,0018\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{anno}$ (con un errore standard di $0,001$) per le massime, $0,029\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{anno}$ (errore standard $0,001$) per le minime e $0,015\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{anno}$ (errore standard $0,001$) per le temperature medie. A tali valori corrisponde rispettivamente, in un decennio, un aumento di $0,018\text{ }^{\circ}\text{C}$, $0,29\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $0,15\text{ }^{\circ}\text{C}$ delle temperature. La pendenza del trend lineare calcolata per le temperature massime giornaliere del capoluogo siciliano presenta un valore notevolmente più basso rispetto ai risultati delle altre città analizzate, che segnala sì la presenza di un leggero aumento delle massime negli anni, ma ad un ritmo significativamente più lento rispetto agli altri casi studio analizzati. Le temperature minime e medie, al contrario, registrano un incremento dello stesso ordine di grandezza delle altre città studiate.

Il modello polinomiale di grado 2 asseconda, per le temperature minime e medie, l'innalzamento tracciando una morbida concavità verso l'alto, la quale suggerisce visivamente come la spinta termica sia entrata in una fase di accelerazione dagli anni Sessanta in poi. Per le temperature massime, invece, il trend polinomiale di secondo grado ricalca quasi precisamente l'andamento del trend lineare della medesima variabile.

Tramite l'aggregazione mensile e annuale affiora il dato fisicamente più caratteristico di questa geografia.

I trend lineari a scala annuale documentano una modesta crescita delle temperature massime, quantificabile in appena $0,0030\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{anno}$ (errore standard $0,0008$), affiancata da un innalzamento più marcato delle temperature medie, pari a $0,014\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{anno}$ (errore standard $0,003$). L'aspetto più rilevante risiede però nel comportamento delle temperature minime: l'andamento lineare annuale palesa un riscaldamento più consistente di questa variabile rispetto agli altri parametri, con una pendenza che raggiunge il valore di $0,028\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{anno}$ (errore standard $0,004$). Questo dato, supportato dall'inclinazione visiva dei grafici, delinea un quadro di asimmetria termica comparabile con quello documentato a Torino, dove le minime presentano un andamento molto più ripido delle massime: a Palermo, il riscaldamento dell'estremo inferiore cresce a un ritmo di oltre un ordine di grandezza superiore rispetto a quello dell'estremo superiore.

Il trend lineare mensile registra una pendenza di $0,0015\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{anno}$ (errore standard $0,007$) per le massime, $0,029\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{anno}$ (errore standard $0,007$) per le minime e $0,015\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{anno}$ (errore standard $0,007$) per le medie, confermando quanto descritto per i trend annuali e la forte asimmetria nell'andamento dei due estremi.

Il trend polinomiale di grado 2 cristallizza l'entità del fenomeno. Se sulla scala mensile la parabola mantiene, per tutti e tre i parametri, la struttura descritta per i trend polinomiali giornalieri, sulla scala annuale la curva suggerisce risultati più interessanti.

Per le temperature massime, infatti, a questo livello di aggregazione emerge una concavità più chiara, ma non troppo ripida, con il proprio flesso inferiore localizzato durante gli anni Ottanta.

La curva delle temperature minime mostra, invece, un abbassamento delle temperature tra il 1960 e il 1980, seguito da una forte accelerazione verticale della curva che esprime un aumento costante e repentino di tali temperature.

L'andamento del trend polinomiale di grado 2 delle medie risente e sintetizza quello delle sue due variabili genitrici, mostrandosi però più influenzato dalla forma delle minime. La curva delle temperature medie, infatti, risulta anche visivamente più affine alla traiettoria descritta per le temperature minime.

A corollario di tali macro-dinamiche fisiche, l'analisi dell'autocorrelazione fornisce la misura della stabilità del sistema.

A scala mensile, i correlogrammi restituiscono l'impeccabile architettura sinusoidale, con massimi e minimi rigorosamente alternati ai lag 12 e 6, frutto, come già descritto per le altre città, dall'andamento stagionale tipico dei nostri climi.

Sposando l'ottica annuale, tuttavia, l'inerzia del sistema si incrina. Il decadimento dei valori positivi risulta rapido e assai più irregolare, simile a quanto osservato per la città di Napoli. Per le temperature massime, infatti, il grafico dell'autocorrelazione presenta un andamento fortemente oscillatorio, raggiungendo lo zero già dal sesto lag, per poi risalire fino al decimo ed undicesimo lag, dove riassume valori negativi; a 12 lag il correlogramma è nuovamente positivo fino al quattordicesimo lag dove si negativizza definitivamente fino ad annullarsi a 19 lag. Il grafico delle temperature minime, al contrario decresce con costanza, mantenendo sempre valori positivi fino ad annullarsi in corrispondenza del diciannovesimo lag. I correlogrammi delle temperature medie riflettono l'irregolarità delle massime, ma mantenendo una certa regolarità, frutto dell'influenza del grafico delle minime.

Questo comportamento certifica un'evidente frammentazione della similarità interannuale, inaugurando una fase climatica in cui la persistenza statistica di lungo periodo risulta incerta ed irregolare.

Palermo Osservatorio Astronomico	Pendenze Temperature massime [°C/anno ± errore standard]	Pendenze Temperature minime [°C/anno ± errore standard]	Pendenze Temperature medie [°C/anno ± errore standard]
Serie giornaliere	0,002 ± 0,002	0,03 ± 0,001	0,02 ± 0,001
Serie mensili	0,002 ± 0,007	0,03 ± 0,007	0,02 ± 0,007
Serie annuali	0,0008 ± 0,003	0,03 ± 0,004	0,02 ± 0,003

Tabella 10. Tabella riassuntiva delle pendenze dei trend lineari ottenute per la stazione di Palermo
Osservatorio Astronomico

Analisi e confronto dei risultati ottenuti

Confrontando i risultati ottenuti per le cinque città, è opportuno evidenziare come, nonostante le profonde differenze geografiche e climatiche che caratterizzano i capoluoghi analizzati, emerga un risultato comune e inequivocabile: tutte le città mostrano un trend crescente delle temperature massime, minime e medie, indipendentemente dalla scala temporale adottata. Tale uniformità costituisce un'importante conferma della diffusione del riscaldamento climatico sull'intero territorio nazionale e suggerisce come il fenomeno interessi indistintamente contesti urbani appartenenti a differenti zone climatiche italiane. Sebbene l'intensità del riscaldamento e le modalità con cui esso si manifesta risultino differenti da città a città, nessuno dei capoluoghi esaminati presenta segnali di stabilizzazione o di raffreddamento nel lungo periodo, delineando un quadro coerente con l'evoluzione climatica osservata a livello globale.

Il confronto tra le diverse serie storiche mette, inoltre, in evidenza quanto la lunghezza delle registrazioni costituisca un elemento determinante nell'interpretazione dei trend. Le serie ultracentenarie di Milano e Torino rappresentano, sotto questo aspetto, un patrimonio scientifico di particolare valore, poiché consentono di estendere l'analisi ben oltre il periodo del riscaldamento contemporaneo, includendo anche importanti oscillazioni climatiche storiche. I trend polinomiali di entrambe le città mostrano, infatti, gli effetti della cosiddetta Piccola Era Glaciale, individuando un minimo termico collocabile tra la prima metà e la metà del XIX secolo, seguito da una progressiva ripresa delle temperature che accelera sensibilmente nel corso della seconda metà del Novecento. La possibilità di osservare, all'interno della medesima serie, sia una fase di raffreddamento sia la successiva inversione di tendenza conferisce a tali dataset un valore interpretativo superiore rispetto alle serie più recenti, permettendo di contestualizzare il riscaldamento attuale all'interno di una dinamica climatica di lungo periodo.

La maggiore estensione temporale delle serie di Milano e Torino influenza, tuttavia, anche il valore dei trend lineari calcolati. Le pendenze registrate in questi due capoluoghi risultano, infatti, sensibilmente inferiori rispetto a quelle ottenute per Roma e Napoli, non perché il riscaldamento recente sia meno intenso, ma perché esso rappresenta una porzione relativamente ridotta dell'intera serie storica. L'inclusione di oltre un secolo di osservazioni, comprendente periodi caratterizzati da condizioni climatiche differenti e da

fasi di relativa stabilità termica, tende, infatti, ad attenuare matematicamente la pendenza media del trend lineare.

Al contrario, nelle serie più brevi il riscaldamento degli ultimi decenni occupa una frazione molto più consistente dell'intervallo analizzato, contribuendo in misura maggiore al calcolo della regressione e determinando pendenze apparentemente più elevate. Tale considerazione suggerisce come il confronto diretto tra i valori assoluti dei trend debba sempre essere accompagnato da una valutazione critica dell'estensione temporale dei dataset utilizzati.

Pur con questa necessaria cautela metodologica, il confronto tra i cinque capoluoghi permette di evidenziare alcune differenze climatiche. Considerando le pendenze dei trend lineari, Roma risulta il centro urbano che presenta il riscaldamento più rapido, seguita da Napoli, mentre Milano e Torino registrano gli incrementi medi più contenuti. Tale graduatoria, tuttavia, riflette in larga misura la diversa estensione temporale delle serie storiche e non deve essere interpretata come una misura assoluta dell'intensità del cambiamento climatico nei diversi contesti urbani.

Dal punto di vista delle condizioni termiche assolute, Palermo e Napoli confermano il carattere più caldo del clima mediterraneo meridionale, mentre Torino e soprattutto Milano mantengono, nel complesso della loro evoluzione storica, valori medi inferiori, coerenti con il clima temperato subcontinentale della Pianura Padana. Roma occupa una posizione intermedia, ma presenta il più marcato incremento delle temperature nel periodo osservato, aspetto che suggerisce una particolare vulnerabilità nei confronti di futuri episodi di caldo estremo.

Un ulteriore aspetto emerso dall'analisi riguarda la qualità e la continuità delle registrazioni disponibili. L'affidabilità delle elaborazioni statistiche dipende, infatti, non soltanto dalla lunghezza delle serie, ma anche dalla loro completezza.

Il caso di Napoli costituisce l'esempio più evidente di questa problematica: la presenza di numerose lacune nelle osservazioni del 2015 genera, nello studio delle aggregazioni annuali, un'anomalia negativa particolarmente marcata che altera significativamente la forma del trend polinomiale, inducendo un apparente rallentamento del riscaldamento negli ultimi anni che non trova, però, riscontro nell'andamento generale della serie. Tale deformazione si riflette anche sull'analisi dell'autocorrelazione, compromettendo la persistenza statistica del segnale climatico.

Questo esempio suggerisce la necessità di valutare criticamente eventuali anomalie prima di attribuire loro un significato climatico.

Il confronto tra i diversi capoluoghi evidenzia, inoltre, un'interessante asimmetria nell'evoluzione delle temperature estreme.

Nelle città di Roma e Milano, il riscaldamento interessa prevalentemente le temperature massime, indicando un progressivo incremento dell'intensità del caldo diurno e una maggiore frequenza di condizioni favorevoli agli eventi di calore estremo.

In altri contesti, invece, prevale l'aumento delle temperature minime, come osservato a Torino e, in misura ancora più evidente, a Palermo. In quest'ultimo caso le temperature minime crescono con un'intensità di oltre un ordine di grandezza superiore rispetto alle massime, delineando un comportamento profondamente diverso da quello riscontrato negli altri centri.

Questa eterogeneità suggerisce che il riscaldamento urbano non si manifesti secondo modalità univoche, ma risenta probabilmente dell'interazione tra fattori geografici, morfologici e microclimatici propri di ciascun contesto urbano, quali la continentalità, la vicinanza al mare, la ventilazione locale, la conformazione del tessuto edificato e le caratteristiche delle superfici urbane.

In definitiva, l'analisi comparativa evidenzia come il cambiamento climatico in ambito urbano costituisca un fenomeno comune a tutti i principali capoluoghi italiani, pur assumendo caratteristiche differenti in funzione delle peculiarità locali e della qualità delle serie disponibili.

Le differenze riscontrate tra le città non ridimensionano la portata del riscaldamento in atto, ma ne sottolineano piuttosto la complessità e la necessità di sviluppare strategie di adattamento calibrate sulle specificità climatiche e morfologiche dei singoli contesti urbani: non esiste una "bonifica climatica" standardizzabile o un protocollo di mitigazione universale, ma diversi scenari locali sui quali aggiustare i modelli generali.

La crescente intensificazione delle temperature osservata in tutti i capoluoghi analizzati conferma l'urgenza di integrare la conoscenza delle dinamiche climatiche storiche nella pianificazione urbanistica, nella progettazione edilizia e nelle future politiche di mitigazione e adattamento, affinché le città possano affrontare le sfide poste dal riscaldamento climatico dei prossimi decenni.

	Serie giornaliere		
Capoluoghi	Pendenze Temperature massime [°C/anno ± errore standard]	Pendenze Temperature minime [°C/anno ± errore standard]	Pendenze Temperature medie [°C/anno ± errore standard]
Roma	0,07 ± 0,003	0,05 ± 0,003	0,06 ± 0,003
Milano	0,01 ± 0,0004	0,005 ± 0,0003	0,009 ± 0,0004
Napoli	0,05 ± 0,003	0,06 ± 0,003	0,05 ± 0,003
Torino	0,008 ± 0,0004	0,009 ± 0,0004	0,008 ± 0,0004
Palermo	0,002 ± 0,002	0,03 ± 0,001	0,02 ± 0,001

Tabella 11. Tabella comparativa delle pendenze dei trend lineari ottenute dall'analisi delle serie giornaliere dei cinque capoluoghi

	Serie mensili		
Capoluoghi	Pendenze Temperature massime [°C/anno ± errore standard]	Pendenze Temperature minime [°C/anno ± errore standard]	Pendenze Temperature medie [°C/anno ± errore standard]
Roma	0,07 ± 0,02	0,05 ± 0,01	0,06 ± 0,01
Milano	0,01 ± 0,002	0,005 ± 0,002	0,009 ± 0,002
Napoli	0,05 ± 0,02	0,06 ± 0,02	0,05 ± 0,02
Torino	0,008 ± 0,002	0,009 ± 0,002	0,008 ± 0,002
Palermo	0,002 ± 0,007	0,03 ± 0,007	0,02 ± 0,007

Tabella 12. Tabella comparativa delle pendenze dei trend lineari ottenute dall'analisi delle serie mensili dei cinque capoluoghi

	Serie annuali		
Capoluoghi	Pendenze Temperature massime [°C/anno ± errore standard]	Pendenze Temperature minime [°C/anno ± errore standard]	Pendenze Temperature medie [°C/anno ± errore standard]
Roma	0,07 ± 0,006	0,05 ± 0,005	0,06 ± 0,005
Milano	0,01 ± 0,0007	0,005 ± 0,001	0,009 ± 0,0007
Napoli	0,04 ± 0,008	0,05 ± 0,006	0,05 ± 0,007
Torino	0,008 ± 0,0008	0,009 ± 0,0008	0,008 ± 0,0007
Palermo	0,0008 ± 0,003	0,03 ± 0,004	0,02 ± 0,003

Tabella 13. Tabella comparativa delle pendenze dei trend lineari ottenute dall'analisi delle serie annuali dei cinque capoluoghi

Capitolo 5: Strategie di adattamento al riscaldamento climatico in ambito urbano

Per affrontare la sfida del cambiamento climatico è necessario lavorare parallelamente su due piani progettuali. Da un lato è fondamentale studiare ed applicare politiche e strategie di mitigazione del cambiamento climatico per frenare i trend di riscaldamento e prevenire l'aggravarsi delle conseguenze che ne derivano, mentre, dall'altro, è cruciale preparare il territorio e la popolazione ad affrontare gli effetti di tali conseguenze attraverso la pianificazione di interventi adeguati.

La *mitigazione* include tutte le strategie che intervengono sulle cause del cambiamento climatico, agendo all'origine del problema, con l'obiettivo di promuovere la transizione verso modelli sociali, economici, industriali e di sviluppo più sostenibili.

Proprio perché caratterizzata da interventi strutturali ed a lungo termine, la mitigazione non è lo strumento giusto con cui far fronte alle emergenze climatiche già in atto, ma è un valido alleato per limitare i danni ed i rischi futuri. I benefici della mitigazione, infatti, sono visibili a lungo termine e non nell'immediato. Questo strumento risulta, in generale, più efficace nella prevenzione del cambiamento climatico su scala globale e nella sua complessità.

Alcuni esempi di strategie di mitigazione sono le politiche improntate alla riduzione della domanda energetica e al miglioramento della relativa efficienza, la decarbonizzazione del sistema energetico mediante l'impiego di fonti rinnovabili, la tutela e l'incremento dei pozzi naturali di carbonio mediante la riforestazione e la gestione sostenibile delle foreste e del suolo.²⁴

L'*adattamento*, invece, rappresenta l'insieme di "accortezze pratiche" da implementare nei centri abitati e nelle aree soggette a rischi specifici, per evitare che le conseguenze del cambiamento climatico abbiano un impatto estremo e dagli esiti funesti.

In altri termini, l'adattamento è l'insieme delle strategie, delle misure e degli interventi finalizzati ad aumentare la capacità dei sistemi naturali e antropici di rispondere agli effetti,

²⁴ Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2022). *Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157926>.

attuali ed attesi, dei cambiamenti climatici, riducendone la vulnerabilità e incrementandone la resilienza.

L'adattamento interviene, ad esempio, per ridurre i danni ed i rischi associati ad ondate di calore, fenomeni meteorologici estremi, alluvioni e siccità con soluzioni concrete quali tetti verdi, pavimentazioni permeabili, bacini di raccolta delle acque piovane, ecc.

Al contrario della mitigazione, l'adattamento propone soluzioni che migliorano la qualità della vita della popolazione nell'immediato, permettendo di schermare e alleviare gli effetti già visibili del cambiamento climatico.

La progettazione delle strategie di adattamento deve prendere in considerazione tutto il ciclo di vita dell'intervento e dei materiali impiegati nella sua realizzazione. Un adattamento mal progettato, infatti, rischia di apportare tanti danni al sistema quanti sono i benefici che potrebbe offrire.

Parliamo in questo caso di *maladattamento*, definito dall'Intergovernmental Panel on Climate Change delle Nazioni Unite²⁵ come *“l'insieme delle azioni che comportano un aumento del rischio di esiti avversi legati al clima, attraverso l'aumento delle emissioni di gas serra (GHG), l'aumento o lo spostamento della vulnerabilità ai cambiamenti climatici, risultati più iniqui e una diminuzione del benessere, ora o in futuro”*.

Un esempio di maladattamento, descritto anche nel quaderno pubblicato da ISPRA “Verso città resilienti: gli interventi del Programma sperimentale per l'adattamento ai cambiamenti climatici in ambito urbano”²⁶, è rappresentato dall'installazione di sistemi di condizionamento per il raffrescamento degli ambienti.

Se da un lato, infatti, questa decisione progettuale risulta efficace nella riduzione degli effetti delle ondate di calore sulla salute umana, dall'altro determina un incremento dei consumi energetici, che generano un aumento delle emissioni di gas serra: l'azione pensata per ridurre le conseguenze del cambiamento climatico si rivela, pertanto, un amplificatore delle cause.

²⁵ IPCC, *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change – Annex II: Glossary*, Cambridge, Cambridge University Press (2022). <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/chapter/annex-ii/>.

²⁶ ISPRA, *Verso città resilienti: gli interventi del Programma sperimentale per l'adattamento ai cambiamenti climatici in ambito urbano*, Quaderni Ambiente e Società 29/2023, Roma, Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale (2023). <https://www.isprambiente.gov.it/it/pubblicazioni/quaderni/ambiente-e-societa/verso-citta-resilienti-gli-interventi-del-programma-sperimentale-per-l-adattamento-ai-cambiamenti-climatici-in-ambito-urbano>.

Un altro esempio di maladattamento ricorrente è rappresentato dalla realizzazione di pavimentazioni drenanti mediante l'utilizzo di griglie alveolari "salva prato" in materiale plastico. Tali profili polimerici, seppur efficaci nel loro ruolo di compattare la superficie terrosa naturale, conservandone la completa permeabilità, si degradano nel tempo disperdendo importanti quantità di microplastiche nell'ambiente. Oltre a questa forma di danno ambientale è da considerare anche l'impatto del ciclo produttivo e di smaltimento dei materiali plastici che costituiscono questi profili alveolati.

Il maladattamento non è, quindi, un risultato cercato dalla progettazione, ma è una conseguenza non voluta di una pianificazione erronea e poco lungimirante.



Figura 179. Installazione della Biennale di Venezia 2025 che simula, in forma critica, l'effetto soffocante del calore generato da un elevato numero di elementi esterni di impianti di raffrescamento in un sistema chiuso (metaforicamente l'ambiente urbano e, più in generale, il pianeta Terra).

Foto: Irene Fanizza. Fonte: www.tribune.com

Secondo il "Programma sperimentale per l'adattamento ai cambiamenti climatici in ambito urbano"²⁷, in accordo con le convenzioni internazionali, le strategie di adattamento in città possono essere organizzate in quattro macrocategorie: interventi *green*, interventi *blue*, interventi *grey* e interventi *soft*.

Gli interventi green

Le strategie green sono soluzioni che sfruttano i processi naturali e i servizi ecosistemici per aumentare la resilienza degli ambienti urbani ai cambiamenti climatici.

²⁷ ISPRA, *Verso città resilienti: gli interventi del Programma sperimentale per l'adattamento ai cambiamenti climatici in ambito urbano*, Quaderni Ambiente e Società 29/2023, Roma, Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale (2023). <https://www.isprambiente.gov.it/it/pubblicazioni/quaderni/ambiente-e-societa/verso-citta-resilienti-gli-interventi-del-programma-sperimentale-per-l-adattamento-ai-cambiamenti-climatici-in-ambito-urbano>.

Appartengono a questa categoria sia la realizzazione di aree verdi urbane e la piantumazione di foreste periurbane che la progettazione di interventi di edilizia climatica. Questa seconda tipologia di interventi racchiude tutte le soluzioni tecnologiche ed infrastrutturali che permettono agli edifici cittadini di rispondere allo stress climatico in maniera passiva, attraverso, ad esempio, la realizzazione di tetti e pareti verdi, la progettazione di coperture e facciate ventilate, l'utilizzo di materiali a basso assorbimento di calore e l'implementazione di sistemi di coibentazione per gli edifici.

Queste due sottocategorie delle strategie green si differenziano per il rapporto tra componente tecnologica e naturale.

Gli interventi di piantumazione prevedono una quasi totale rinaturalizzazione dell'area urbana dove vengono inseriti, introducendo in tale zona tutti i benefici ambientali, sociali ed economici che caratterizzano l'ambiente naturale. Questo gruppo di interventi non prevede l'uso di particolari tecnologie, ma solo di soluzioni naturali.

Al contrario la sottocategoria a cui appartengono l'edilizia climatica, l'uso di materiali riflettenti e la realizzazione di serre solari, rappresenta un approccio passivo che integra sia soluzioni naturali che tecnologie ed infrastrutture artificiali. Queste soluzioni, molto efficaci nel rendere resiliente il costruito, presentano, tuttavia, delle criticità in più dovute all'impiego di materiali e prodotti impattanti in fase di produzione e smaltimento.

In generale, gli interventi green presentano numerosi vantaggi: attraverso l'ombreggiamento, l'evapotraspirazione e l'incremento della permeabilità dei suoli, contribuiscono a mitigare l'effetto isola di calore, a favorire l'infiltrazione delle acque meteoriche e a ridurre il rischio di allagamenti, migliorando nel contempo la qualità dell'aria, la biodiversità e il benessere della popolazione. Sono, infatti, efficaci anche nella creazione di spazi sociali di qualità e nella promozione della rigenerazione urbana. L'edilizia climatica è, inoltre, funzionale allo sviluppo di un patrimonio edile adeguato alle esigenze del nuovo clima, riducendo la dipendenza delle abitazioni da sistemi di adattamento energivori come l'impiego di impianti di climatizzazione.

Tra gli svantaggi troviamo, però, l'impatto della produzione e dello smaltimento delle tecnologie impiegate nell'edilizia climatica, che coinvolgono processi spesso molto energivori e che usano materiali non recuperabili, e la gestione del rifiuto generato dalla de-sigillazione del suolo urbano per la realizzazione delle aree verdi. Le pavimentazioni

bituminose rimosse, infatti, finiscono spesso in discarica e non è attualmente previsto un sistema di recupero soddisfacente di tali scarti.

Gli interventi blue

Gli interventi blue comprendono tutte le strategie che prevedono l'impiego dell'acqua come elemento di regolazione del microclima urbano e che sono finalizzate alla gestione sostenibile delle risorse idriche. Rientrano in questa categoria, ad esempio, la realizzazione di sistemi di raccolta delle acque meteoriche, come bacini e vasche di laminazione, gli interventi di riciclo e riuso delle acque reflue depurate e la progettazione di aree di infiltrazione e rain gardens.

Tali soluzioni favoriscono un utilizzo più efficiente della risorsa idrica, promuovendo principi di economia circolare e una gestione sostenibile del ciclo idrico in città.

L'integrazione dell'acqua nella progettazione dello spazio urbano consente di ridurre il deflusso superficiale e il rischio di allagamenti, favorendo al contempo la ricarica della falda e la gestione delle precipitazioni intense direttamente nel luogo in cui si generano.

La presenza di superfici e corpi idrici può, inoltre, cooperare nel raffrescamento dell'ambiente urbano, sfruttando i fenomeni di evaporazione ed evapotraspirazione, per ridurre gli effetti dell'isola di calore urbana e aumentare il confort termoigrometrico dei cittadini.

Se opportunamente progettati, gli interventi blue possono giocare un ruolo importante anche nell'incrementare la qualità paesaggistica degli spazi pubblici e favorire la biodiversità.

Accanto ai numerosi benefici, tali strategie presentano, però, anche alcune criticità. La loro efficacia dipende, infatti, da una corretta progettazione idraulica e da un'adeguata manutenzione nel tempo, necessaria per evitare fenomeni di intasamento, perdita di capacità drenante o ristagno delle acque. In contesti urbani fortemente impermeabilizzati, inoltre, l'inserimento di queste infrastrutture può richiedere interventi complessi sul sottosuolo e sulla rete dei sottoservizi, con conseguenti costi di realizzazione elevati.

In aggiunta, questi interventi vengono realizzati mediante l'impiego di materiali e processi impattanti durante tutto il loro ciclo vita.

La forte variabilità meteorica degli ultimi anni introduce un'ulteriore sfida: in presenza di precipitazioni eccezionali superiori agli eventi di progetto, tali sistemi possono non essere sufficienti a garantire il completo contenimento dei deflussi.

Nonostante queste criticità, la categoria degli interventi blue deve rappresentare un ambito di ricerca cruciale per l'adattamento al cambiamento climatico.

Spesso, infatti, le strategie di adattamento si concentrano su interventi finalizzati alla gestione di fenomeni già ben visibili come le ondate di calore e le isole di calore in città, limitando la progettazione dell'infrastruttura blue alla gestione di fenomeni alluvionali e concentrandosi sull'allontanamento delle acque dall'ambiente urbano.

Nell'ottica di un clima che cambia rapidamente e che suggerisce un repentino ed imprevedibile aumento della siccità nella nostra penisola, è, invece, fondamentale progettare già adesso città capaci di stoccare delle riserve idriche da impiegare in mancanza di altre fonti d'acqua.

Gli interventi grey

Gli interventi grey comprendono le opere di riqualificazione dello spazio urbano che, attraverso interventi sulle pavimentazioni e sulle infrastrutture cittadine, mirano a migliorare la gestione delle acque meteoriche e a de-sigillare il suolo urbano.

Rientra in questa categoria la realizzazione di sistemi di drenaggio urbano sostenibile integrati negli spazi pubblici, quali piazze multifunzionali, e gli interventi di de-impermeabilizzazione delle superfici urbane mediante la rimozione delle pavimentazioni esistenti e il ripristino della permeabilità del suolo in aree pedonali, piazze, parcheggi e percorsi, spesso nell'ambito di più ampi progetti di rigenerazione urbana.

Gli interventi grey differiscono da quelli green e blue perché non collaborano davvero all'ampliamento dell'infrastruttura verde e blu, ma promuovono forme di adattamento ibride tra il naturale e l'antropico, da applicare dove non è possibile intervenire direttamente con soluzioni appartenenti alle prime due categorie.

Anche queste strategie consentono di ridurre il deflusso superficiale delle acque meteoriche e il rischio di allagamenti, favorendo l'infiltrazione nel terreno e la ricarica delle falde acquifere. La parziale rinaturalizzazione del suolo contribuisce, inoltre, al miglioramento del microclima urbano attraverso i fenomeni di evaporazione ed

evapotraspirazione e rappresenta un'opportunità per integrare gli obiettivi di adattamento climatico alla rigenerazione urbana.

Tra le principali criticità si evidenziano la gestione dei materiali derivanti dalla rimozione delle pavimentazioni bituminose ed il rischio che le superfici permeabili favoriscano l'infiltrazione nel terreno di sostanze inquinanti e microplastiche trasportate dal ruscellamento superficiale.

La progettazione di tali interventi deve, inoltre, garantire il mantenimento dell'accessibilità e della fruibilità degli spazi pubblici, affinché l'impiego di superfici drenanti e materiali naturali non costituisca un ostacolo per le persone con disabilità o con ridotta mobilità.

Gli interventi soft

Gli interventi soft comprendono tutte le misure non strutturali che rafforzano la capacità di adattamento di un territorio attraverso strumenti di pianificazione, governance, formazione e gestione. Queste strategie non agiscono sullo spazio fisico, ma permettono di creare quella "infrastruttura invisibile" costituita da normative, piani di adattamento, sistemi di monitoraggio e previsione, banche dati climatiche, ecc.

Tale infrastruttura è trasversale alle altre tre categorie di intervento ed è fondamentale per la buona riuscita dei processi di adattamento al cambiamento climatico.

L'infrastruttura soft supporta i processi decisionali alla base dello sviluppo di politiche e normative capaci di guidare la transizione ecologica e promuove il coinvolgimento attivo della popolazione e degli stakeholder nei processi di adattamento. Questi processi partecipativi permettono di velocizzare la realizzazione degli interventi grazie al coordinamento delle azioni e delle risorse economiche di privati ed enti pubblici. L'informazione come prevenzione dei rischi climatici permette, in aggiunta, alla popolazione di affrontare con maggiore preparazione gli eventi estremi, riducendo la vulnerabilità del tessuto sociale e mitigando le conseguenze di tali scenari drammatici sulla salute e sulla vita dei cittadini.

Per queste ragioni, sebbene l'infrastruttura fisica sia imprescindibile per fronteggiare le sfide poste dal cambiamento climatico, anche questa infrastruttura intangibile riveste un ruolo essenziale nel rendere sia le città che la popolazione più resilienti.

	Interventi	Vantaggi	Svantaggi/ Maladattamento	
Green	- Spazi verdi urbani - Forestazione periurbana e urbana - Orti e frutteti urbani - Barriere arboree	Rinaturalizzazione, miglioramento della qualità dell'aria, regolazione del microclima, rigenerazione urbana, servizi ecosistemici e sociali.	Smaltimento rifiuti generati dalla de-sigillazione.	 
	- Uso di materiali a basso assorbimento di calore - Edilizia climatica - Boschi verticali - Serre solari	Rigenerazione urbana, adattamento passivo alle ondate di calore.	Impatto ambientale dei cicli produttivi e di smaltimento delle tecnologie per l'edilizia climatica e per la de-sigillazione delle pavimentazioni.	
Blue	- Sistemi di raccolta delle acque meteoriche - Interventi di riciclo e riuso delle acque reflue depurate - Progettazione di aree di infiltrazione - Rain gardens	Riduzione del deflusso superficiale e degli allagamenti, ricarica della falda, gestione delle precipitazioni intense nel luogo in cui si generano, raffrescamento urbano, incremento della qualità paesaggistica e della biodiversità.	Costi di realizzazione elevati, impatto ambientale dei cicli produttivi e di smaltimento delle tecnologie per l'edilizia climatica e per la de-sigillazione delle pavimentazioni, difficoltà nel prevedere i flussi.	 
Grey	- Pavimentazioni permeabili e drenanti - Piazze d'acqua - Rain gardens	Riduzione del deflusso superficiale e allagamenti, infiltrazione piovana nel terreno, ricarica delle falde acquifere, miglioramento del microclima,	Costi di realizzazione elevati, impatto ambientale dei cicli produttivi e di smaltimento delle nuove infrastrutture, smaltimento delle pavimentazioni rimosse,	  

		rigenerazione urbana.	rischio di infiltrazione nel terreno di sostanze inquinanti e ostacolo all'accessibilità.	
Soft	- Normative - Piani di adattamento - Sistemi di monitoraggio e previsione - Banche dati climatiche - Iniziative di sensibilizzazione e partecipazione rivolte a cittadini	Supporto ai processi decisionali, coinvolgimento economico degli stakeholders nella transizione, preparazione della popolazione agli eventi estremi, coordinamento della ricerca, coordinamento degli interventi.	/	  

	Efficace per l'adattamento alle onde di calore
	Efficace per l'adattamento a fenomeni metereologici estremi
	Efficace per la prevenzione di fenomeni di siccità

Tabella13. Tabella riassuntiva delle quattro categorie di interventi per l'adattamento al cambiamento climatico e delle loro caratteristiche principali

Valutando vantaggi e svantaggi delle varie categorie descritte, gli interventi green risultano la famiglia più efficace nel perseguire la transizione verso città resilienti.

Se ci si concentra in particolare sul riscaldamento climatico in ambito urbano, le azioni basate sulla reintroduzione della natura e l'aumento della dotazione di verde risultano essere le più funzionali sia per i benefici che apportano che per il basso rischio di maladattamento.

Le strategie di rinaturalizzazione, infatti, agiscono su un duplice piano: da un lato contribuiscono all'adattamento del tessuto urbano alle conseguenze del cambiamento climatico, mentre dall'altro lavorano su una scala temporale più lunga, cooperando alla mitigazione della crisi climatica. Nell'immediato le aree verdi urbane ristabiliscono il

microclima, riducono l'effetto calorifero della radiazione solare impiegandola in processi di evapotraspirazione e fungono da riparo ombroso nelle ore più calde; in contemporanea le piante presenti catturano la CO₂, principale gas climalterante responsabile dell'effetto serra, imputabile per l'innalzamento delle temperature terrestri.

Proprio per tale combinazione di benefici, questo tipo di interventi è ritenuto prioritario nella scelta delle diverse opzioni di adattamento per la loro capacità di fornire un ampio spettro di vantaggi ambientali, sociali ed economici²⁸ e di collaborare, nel contempo, ai processi di mitigazione.

La scelta più efficace è, pertanto, anche la più naturale, suggerendo come forse sia importante affrontare la sfida del cambiamento climatico guardando alla natura stessa come fonte di ispirazione e ripensando i nostri modelli di intervento in un'ottica più organica ed interdisciplinare.

²⁸ European Environment Agency, “4.3 Preparing a Strategy Document and Getting Political Approval”, Climate-ADAPT: Urban Adaptation Support Tool. <https://climate-adapt.eea.europa.eu/en/knowledge/tools/urban-ast/step-4-3>.

Conclusione

Il seguente lavoro nasce dalla volontà di studiare il clima dei capoluoghi italiani per fornire ad architetti e ingegneri nuovi strumenti per comprendere i fenomeni legati al cambiamento climatico. Analizzare il clima, infatti, aiuta i progettisti sia a sviluppare una coscienza critica sul tema che ad interfacciarsi e collaborare con altri ricercatori e studiosi, per affrontare al meglio le sfide della crisi ambientale. Questa cooperazione ha come obiettivo lo sviluppo di strategie di adattamento e mitigazione consapevoli che migliorino la resilienza del costruito e che riducano la vulnerabilità dei centri urbani alle conseguenze del riscaldamento climatico.

Nell'ambito di questo progetto è stato, quindi, scritto un programma nel linguaggio di programmazione R, utilizzando l'ambiente di sviluppo RStudio, con l'obiettivo di automatizzare l'intero processo di analisi delle serie climatiche. Questa automatizzazione ha permesso di studiare una grande quantità di dati e rende riproducibile lo studio.

Il programma è stato sviluppato per analizzare il trend lineare, i trend polinomiali (di secondo, terzo, quarto e quinto grado) e l'autocorrelazione delle serie climatiche giornaliere, mensili e annuali dei quattro principali parametri meteorologici: la temperatura massima, la temperatura minima, la temperatura media e le precipitazioni. Tuttavia, in fase di analisi, è stato deciso di focalizzare lo studio sui parametri di temperatura e di escludere dai risultati i trend polinomiali di grado superiore al secondo. Il programma conserva, però, le funzioni omesse che potranno essere utilizzate per approfondimenti futuri.

Oltre alle funzioni analitiche, all'interno dello script è stata data particolare rilevanza alla definizione di parametri grafici che consentano di adattare l'estetica degli output alle esigenze dell'esecutore. È stata, inoltre, implementata una funzione che permette il salvataggio automatico degli output ottenuti sia in formato raster (file .png) che in formato vettoriale (con estensione .PDF).

L'analisi condotta si concentra sullo studio dei parametri di temperatura per approfondire il tema del riscaldamento climatico in ambito urbano. Le ondate di calore, esacerbate dal fenomeno dell'isola di calore, infatti, mettono sempre più in pericolo la salute e la vita dei cittadini italiani. Comprendere e gestire questa emergenza è fondamentale per

salvaguardare il benessere della popolazione italiana che vive per più del 70% in centri urbani.

Oltre ai rischi per la popolazione, il caldo eccessivo provoca gravi danni ad ecosistemi, infrastrutture, settore agricolo e settore zootecnico. Il riscaldamento climatico, inoltre, è collegato a fenomeni meteorologici estremi che provocano danni economici sempre più preoccupanti per la società europea.

Lo studio climatico presentato in questo elaborato è stato condotto sui primi cinque capoluoghi italiani per numero di abitanti: Roma, Milano, Napoli, Torino e Palermo. Per ciascuna di queste città è stata scelta una stazione meteorologica all'interno del tessuto urbano dalla quale sono state ricavate le serie giornaliere di temperature massime e minime da analizzare. Con questi dati di input, il programma scritto in RStudio ha restituito, per le cinque città, i risultati ed i grafici relativi alle tendenze climatiche e all'autocorrelazione.

Da tali output emerge come tutte le città analizzate siano interessate da un chiaro processo di riscaldamento, evidenziato dall'incremento delle temperature massime, minime e medie a tutte le scale temporali considerate (giornaliera, mensile e annuale). Pur con intensità differenti, nessun capoluogo mostra segnali di raffreddamento o di stabilizzazione nel lungo periodo, confermando la diffusione del cambiamento climatico in contesti urbani caratterizzati da condizioni geografiche e climatiche molto diverse.

Particolarmente interessanti risultano le serie ultracentenarie di Milano e Torino. La loro estensione temporale permette di confrontare la marcata accelerazione del riscaldamento osservata a partire dalla seconda metà del Novecento con le temperature del periodo antecedente il 1800, data associata, convenzionalmente, all'avvento della Rivoluzione Industriale, ovvero al cambiamento storico che segna l'inizio dei processi sociali, economici e produttivi identificati tra le cause del cambiamento climatico di origine antropica. Serie di dati così lunghe permettono, inoltre, di rilevare le principali oscillazioni climatiche storiche, come il fenomeno della Piccola Era Glaciale.

La diversa estensione temporale delle serie storiche rappresenta, tuttavia, un ostacolo in fase di confronto dei risultati ottenuti per le diverse città. Per ragioni statistiche, infatti, dataset più lunghi tendono a restituire pendenze medie inferiori rispetto a serie più recenti, senza che ciò implichi un minore riscaldamento negli ultimi decenni.

In questo progetto si è scelto di valorizzare la lunghezza disponibile delle serie per avere una visione il più completa possibile del clima in ciascun capoluogo. All'interno del

programma, però, è possibile definire l'anno del dataset da cui far iniziare l'analisi, lasciando la possibilità di condurre in futuro uno studio differente, finalizzato al confronto del clima dei cinque capoluoghi.

L'analisi condotta evidenzia differenze nelle modalità con cui il riscaldamento si manifesta: in alcune città, come Roma e Milano, l'incremento interessa prevalentemente le temperature massime, mentre per altri centri urbani, quali Torino e soprattutto Palermo, risultano più marcate le pendenze dei trend delle temperature minime. Questo risultato suggerisce come vi sia un'influenza dei fattori geografici, morfologici e microclimatici locali sulle tendenze climatiche di ciascun capoluogo ed evidenzia la necessità di condurre nuovi studi specifici per comprendere queste relazioni.

Infine, lo studio mette in luce l'importanza della qualità e della continuità delle serie climatiche: la presenza di lacune nelle osservazioni, come nel caso della serie di Napoli, può alterare significativamente i risultati delle analisi statistiche, indicando la necessità di una preventiva valutazione critica dei dati prima della loro interpretazione climatica.

Nel corso dello studio sono emerse anche alcune criticità. La principale riguarda la difficoltà nel reperire serie climatiche storiche complete e facilmente accessibili. A ciò si aggiunge la notevole eterogeneità dei dataset disponibili, sia in termini di lunghezza delle serie sia di qualità e continuità delle osservazioni, fattori che influenzano la confrontabilità dei risultati.

Il lavoro sviluppato costituisce una base per futuri approfondimenti. Tra i possibili sviluppi rientrano l'estensione dell'analisi a un numero maggiore di capoluoghi italiani, la realizzazione di studi comparativi basati su serie storiche di lunghezza omogenea e l'analisi dei trend delle precipitazioni, con l'obiettivo di valutare interventi di adattamento basati sulle strategie blue, per promuovere una gestione più efficace e resiliente della risorsa idrica in ambito urbano.

L'elaborato si conclude con una revisione delle principali strategie di adattamento al riscaldamento climatico in ambito urbano, valutando vantaggi e svantaggi di quattro categorie di intervento: interventi *green*, interventi *blue*, interventi *grey* ed interventi *soft*.

Ne emerge l'importanza degli interventi soft come misure trasversali alle altre categorie di adattamento, capaci di creare un'infrastruttura "invisibile" per trainare la transizione ecologica e ridurre la vulnerabilità dei centri urbani e dei loro cittadini.

Si evince, inoltre, come le strategie green, legate alla piantumazione e alla rinaturalizzazione di aree urbane e periurbane, rappresentino la classe di interventi con il maggior numero di benefici e con il minor rischio di *maladattamento*. La scelta più efficace sembra essere, infatti, anche la più naturale, suggerendo come forse sia importante affrontare la sfida del cambiamento climatico guardando alla natura stessa come fonte di ispirazione e ripensando i nostri modelli di intervento in un'ottica più organica ed interdisciplinare.

Bibliografia

- Allen, C. D., Macalady, A. K., Chenchouni, H., Bachelet, D., McDowell, N., Vennetier, M., ... Cobb, N.. (2010): “A Global Overview of Drought and Heat-Induced Tree Mortality Reveals Emerging Climate Change Risk for Forests”, *Forest Ecology and Management* 259, no. 4: pp. 660-684. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2009.09.001>.
- Anderson, B. G., Bell, M. L. (2009): “Weather-Related Mortality: How Heat, Cold, and Heat Waves Affect Mortality in the United States”, *Epidemiology* 20, no. 2: pp. 205-213.
- ARPA Lombardia, “La stazione di Milano Brera”, *Temi Ambientali: Meteo e clima*. Consultato l'8 luglio 2026. <https://www.arpalombardia.it/temi-ambientali/meteo-e-clima/clima/la-stazione-di-milano-brera/>.
- ARPA Piemonte, “Stazione: Torino - Serie Ultracentenarie - dati dal 1787”, *Dati giornalieri serie centenaria*. Consultato l'8 luglio 2026. https://www.arpa.piemonte.it/rischi_naturali/snippets_arpa_graphs/dati_giornalieri_centenaria/?statid=PIE-001272-100-1787-01-01¶m=P.
- Barriopedro, D., Fischer, E. M., Luterbacher, J., Trigo, R. M., e García-Herrera, R. (2011): “The Hot Summer of 2010: Redrawing the Temperature Record Map of Europe”, *Science* 332: pp. 220-224. <https://doi.org/10.1126/science.1201224>.
- Boero, G. (27 giugno 2026): “Il caldo non è uguale per tutti: nelle periferie italiane cresce la *Cooling poverty*”, *La Repubblica*. https://www.repubblica.it/cronaca/2026/06/27/news/il_caldo_non_e_uguale_per_tutti_nelle_periferie_italiane_cresce_la_cooling_poverty-425437103/.
- Brockwell, P. J., e Davis, R. A. (2016): *Introduzione alle serie storiche e alla previsione*. Milano: Apogeo Education.
- Cicchitelli, G. (2017): *Statistica: principi e metodi*. Milano: Pearson Italia.

- Del Gobbo, C., Colucci, R. R., Monegato, G., Manja, Ž., e Giorgi, F. (2023): “Atmosphere–Cryosphere Interactions During the Last Phase of the Last Glacial Maximum (21 ka) in the European Alps”, *Climate of the Past* 19, no. 9: pp. 1805-1823. <https://doi.org/10.5194/cp-19-1805-2023>.
- MeteoSvizzera (s.d.): *Omogeneizzazione delle serie di misura climatiche*. <https://www.meteosvizzera.admin.ch/clima/fondamenti-per-l-analisi-climatica-dati-e-metodi/dati-omogeneizzati-dal-1864/omogeneizzazione-delle-serie-di-misura-climatiche.html>.
- European Environment Agency [EEA] (13 ottobre 2025): “Economic Losses from Weather- and Climate-Related Extremes in Europe”. <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/indicators/economic-losses-from-climate-related>.
- Forzieri, G., Bianchi, A., Batista e Silva, F., Herrera, M. A. M, Leblois, A., Lavalle, C., Aerts, J. C.J.H., Feyen, L. (2018): “Escalating Impacts of Climate Extremes on Critical Infrastructures in Europe”, *Global Environmental Change* 48: pp. 97-107. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2017.11.007>.
- Gandrud, C. (2015): *Reproducible Research with R and RStudio*. Boca Raton: Chapman & Hall/CRC.
- Gasparri, A., Armstrong, B. (2011): “The Impact of Heat Waves on Mortality”, *Epidemiology* 22, no. 1: pp. 68-73.
- Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC] (2022): *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. A cura di Hans-Otto Pörtner, *et al.*, Cambridge e New York: Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009325844>.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2022): *Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth*

Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157926>.

ISPRA – Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale (2023): *Verso città resilienti: gli interventi del Programma sperimentale per l'adattamento ai cambiamenti climatici in ambito urbano*. Quaderni Ambiente e Società, no. 29. Roma: Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale. <https://www.isprambiente.gov.it/it/pubblicazioni/quaderni/ambiente-e-societa/verso-citta-resilienti-gli-interventi-del-programma-sperimentale-per-l-adattamento-ai-cambiamenti-climatici-in-ambito-urbano>.

Istituto Nazionale di Statistica [ISTAT] (2025): *Rapporto annuale 2025: La situazione del Paese*. Roma: Istat. <https://www.istat.it/wp-content/uploads/2025/05/RA-2025-volume-integrale.pdf>.

Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale [ISPRA]: “Dati e Indicatori”, *SCIA: Sistema nazionale per l'elaborazione e diffusione di dati climatici*. Consultato l'8 luglio 2026. <https://scia.isprambiente.it/dati-e-indicatori/>.

Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale [ISPRA] (2026): *Il clima nei capoluoghi delle regioni italiane*. Stato dell'Ambiente 103/2026. Roma: ISPRA. <https://www.isprambiente.gov.it/it/pubblicazioni/stato-dellambiente/il-clima-nei-capoluoghi-delle-regioni-italiane>.

Kochanek, K. D., Xu, J., Murphy, S. L., Miniño, A. M., & Kung, H.-C. (2011): “Deaths: Final Data for 2009”, *National Vital Statistics Reports* 60, no. 3: pp. 1-116.

Mazdiyasni, O., AghaKouchak, A., Davis, S. J., Madadgar, S., Mehran, A., Ragno, E., ... Niknejad, M. (2017): “Increasing Probability of Mortality During Indian Heat Waves”, *Science Advances* 3, no. 6. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1700066>.

Micheloizzi, P. (2025): “Il progetto Climactions: buone pratiche di adattamento e mitigazione dei cambiamenti climatici in 6 città italiane”, *Epidemiologia & Prevenzione* 49, no. 2-3: pp. 5-7. <https://doi.org/10.19191/EP25.2-3.S1.030>.

- Montanari, A. (31 marzo 2026): “The Climate Change Problem”.
<https://www.albertomontanari.it/node/104>.
- Nigrelli, G. (30 agosto 2023): “Nuovi dati sulle tendenze della temperatura nelle Alpi”,
CNR IRPI. <https://www.irpi.cnr.it/nuovi-dati-sulle-tendenze-della-temperatura-nelle-alpi/>.
- Oke, T. R. (1981): “Canyon Geometry and the Nocturnal Urban Heat Island: Comparison of Scale Model and Field Observations”, *Journal of Climatology* 1, no. 3: pp. 237-254.
<https://doi.org/10.1002/joc.3370010304>.
- Oudin Åström, D., Bertil, F., & Joacim, R. (2011): “Heat Wave Impact on Morbidity and Mortality in the Elderly Population: A Review of Recent Studies”, *Maturitas* 69, no. 2: pp. 99-105. <https://doi.org/10.1016/j.maturitas.2011.03.008>.
- Papalexiou, S. M., AghaKouchak, A., Trenberth, K. E., e Foufoula-Georgiou, E. (2018): “Global, Regional, and Megacity Trends in the Highest Temperature of the Year: Diagnostics and Evidence for Accelerating Trends”, *Earth's Future* 6, no. 1: pp. 71-79.
<https://doi.org/10.1002/2017EF000709>.
- Ritchie, H., Rosado, P., e Roser, M. (2024): *Emissions by Sector*. Oxford: Our World in Data. <https://ourworldindata.org/emissions-by-sector>.
- Robine, J.-M., Cheung, S. L. K., Le Roy, S., Van Oyen, H., Griffiths, C., Michel, J.-P., e Herrmann, F. R. (2008): “Death Toll Exceeded 70,000 in Europe During the Summer of 2003”, *Comptes Rendus Biologies* 331, no. 2: pp. 171-178.
<https://doi.org/10.1016/j.crv.2007.12.001>.
- Smoyer-Tomic, K. E., Kuhn, R., & Hudson, A. (2003): “Heat Wave Hazards: An Overview of Heat Wave Impacts in Canada”, *Natural Hazards* 28, no. 2-3: pp. 465-486.
<https://doi.org/10.1023/A:1022946528157>.

- Stott, P. A., Stone, D. A., e Allen, M. R. (2004): “Human Contribution to the European Heatwave of 2003”, *Nature* 432, no. 7017: pp. 610-614. <https://doi.org/10.1038/nature03089>.
- Westerling, A. L., Hidalgo, H. G., Cayan, D. R., e Swetnam, T. W. (2006): “Warming and Earlier Spring Increase Western U.S. Forest Wildfire Activity”, *Science* 313, no. 5789: pp. 940–943. <https://doi.org/10.1126/science.1128834>.
- Wilks, D. S. (2019): *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences*. Amsterdam: Elsevier.
- World Meteorological Organization (2024): *State of the Climate in Europe 2023*. WMO-No. 1350. Ginevra: World Meteorological Organization.
- Zhong, Z., He, B., Chen, H.W. *et al.* (2023): “Reversed Asymmetric Warming of Sub-Diurnal Temperature Over Land During Recent Decades”, *Nat Commun* 14, no. 7189. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-43007-6>.