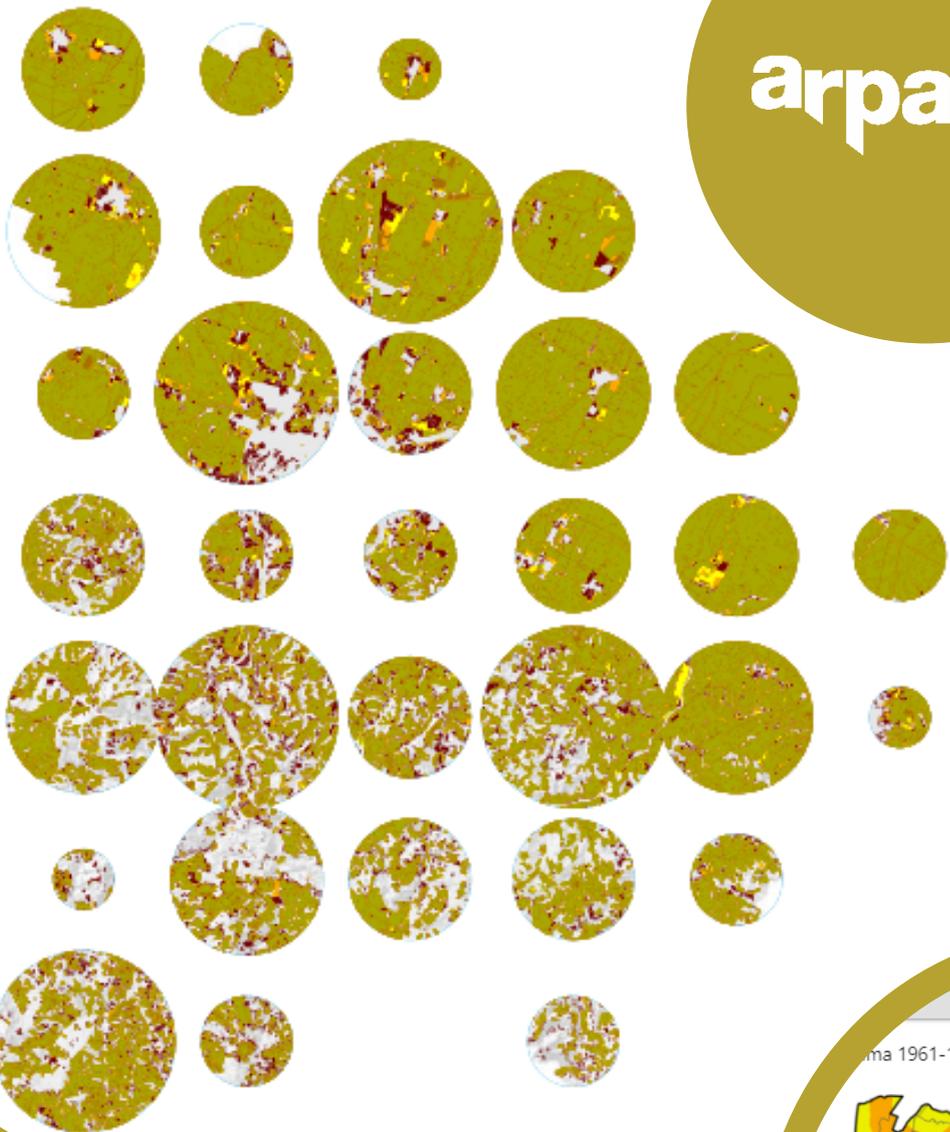


Stesura approvata



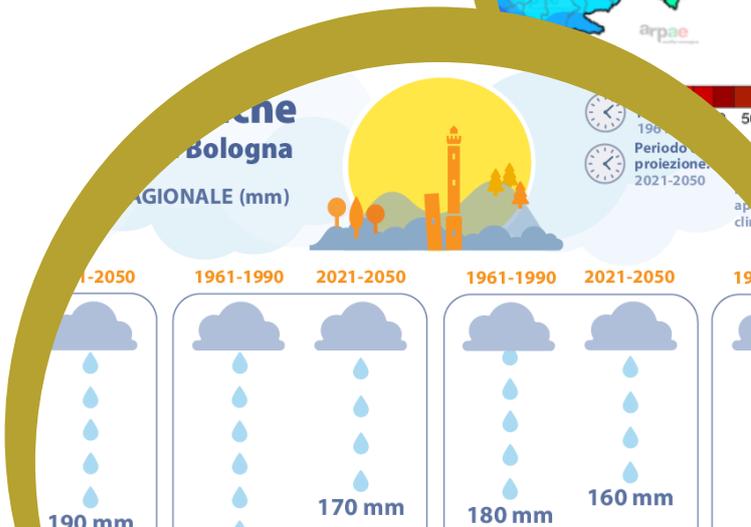
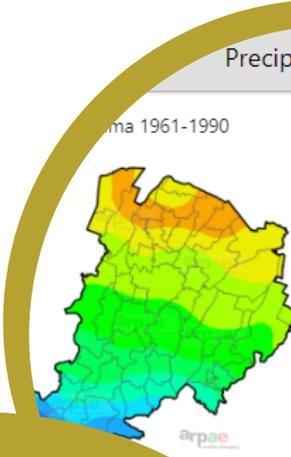
Bo OM

Obiettivi
Metropolitani



Proiezioni climatiche nella Città metropolitana di Bologna

realizzate all'interno del Quadro conoscitivo
definitivo del PTM + infografiche

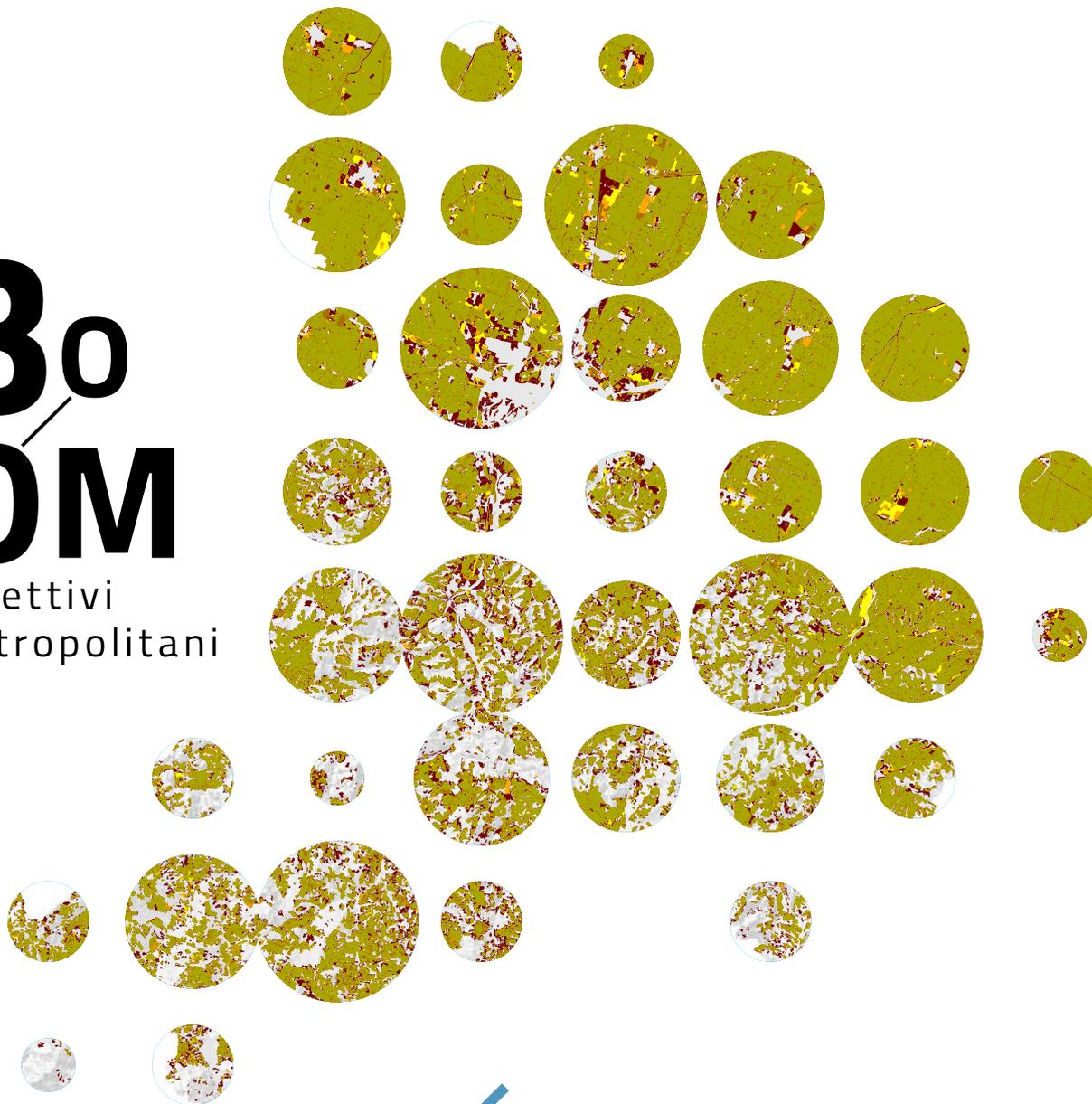


Stesura approvata



Bo OM

Obiettivi
Metropolitani



Quadro
Conoscitivo
Diagnostico

Contesto

del Piano Territoriale Metropolitanano

Profilo climatico osservato

Temperatura

Distribuzione spaziale della temperatura media annua per i periodi: 1961-1990 e 1991-2018

Temperatura media annua 1961-1990

Temperatura media annua 1991-2018

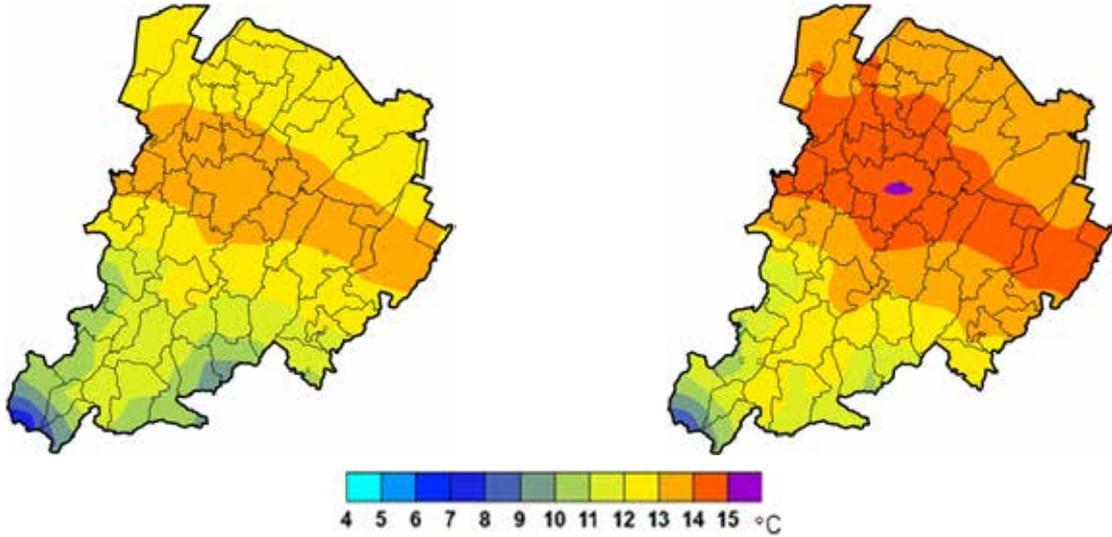
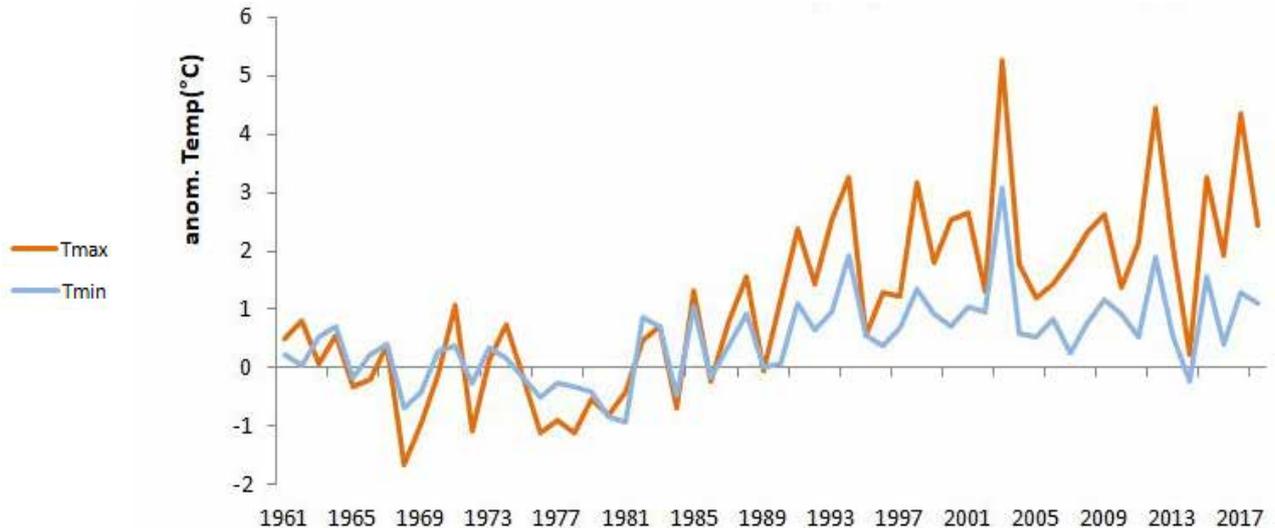


Tabella 1 Coefficienti di tendenza della temperatura media, minima, massima, periodo 1961 - 2018 (valori mediati sulla Città metropolitana)

	Inverno (°C/10 y)	Primavera (°C/10 y)	Estate (°C/10 y)	Autunno (°C/10 y)
T _{med}	0.3	0.3	0.4	0.2
T _{max}	0.4	0.4	0.6	0.2
T _{min}	0.2	0.2	0.2	0.1

Andamento temporale delle anomalie estive di Tmin e Tmax estate- 1961-2018



Quadro informativo

Il profilo climatico osservato sulla città metropolitana di Bologna mostra per la temperatura media annua valori climatici di riferimento (1961-1990) compresi tra 8°C in montagna e circa 14°C in pianura. Lo stesso indicatore calcolato sul periodo più recente, 1991-2018, evidenzia un aumento della temperatura media su tutto il territorio metropolitano, ma particolarmente accentuato nella fascia altamente urbanizzata della via Emilia e sul capoluogo.

Analizzando la tendenza sul lungo periodo, 1961-2018, si nota a livello metropolitano un segnale di aumento delle temperature medie annue di circa 0,3°C/10anni, significativo statisticamente. Questo segnale è stato riscontrato sia nelle minime che nelle massime annue, con valori più intensi nelle temperature massime (circa

0.4 °C/10anni).

A livello **stagionale**, le tendenze sul periodo 1961-2018 sono in aumento in tutte le stagioni, con valori più intensi durante l'estate, coefficienti di tendenza presentati nella tabella 1. Durante **l'estate** sono stati infatti riscontrati incrementi delle temperature massime di 0,6 °C/10 anni. Osservando l'andamento delle anomalie estive di temperatura minima e massima calcolate rispetto al periodo di riferimento 1961-1990 si nota come a partire dal 1990, le anomalie di temperatura massima sono sempre positive raggiungendo circa 4 °C durante le estati del 2012 e 2017, e 5°C nel 2003, rispetto al periodo climatico di riferimento (1961 – 1990).

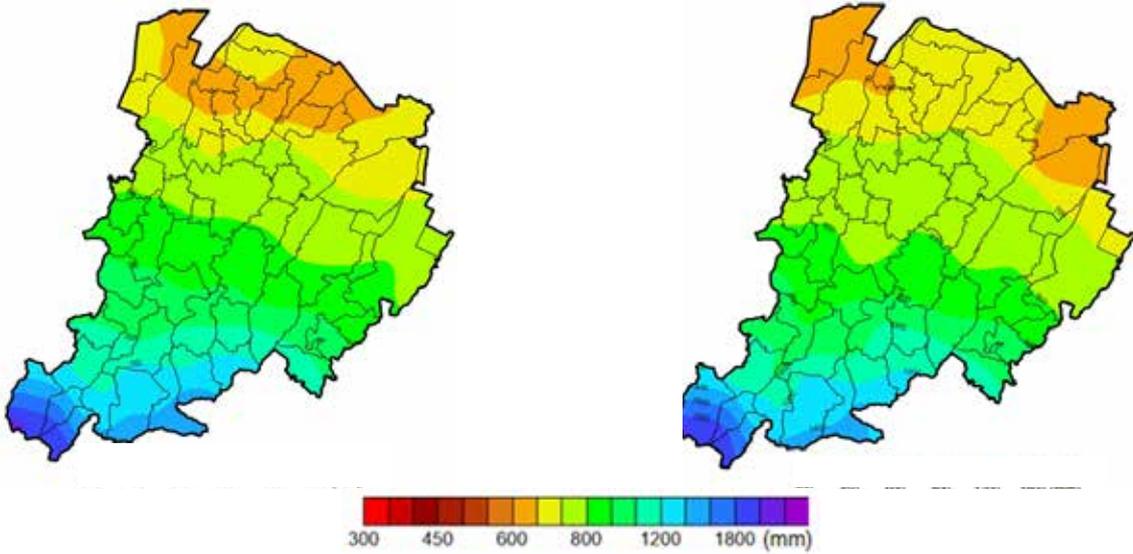
Profilo climatico osservato

Precipitazioni

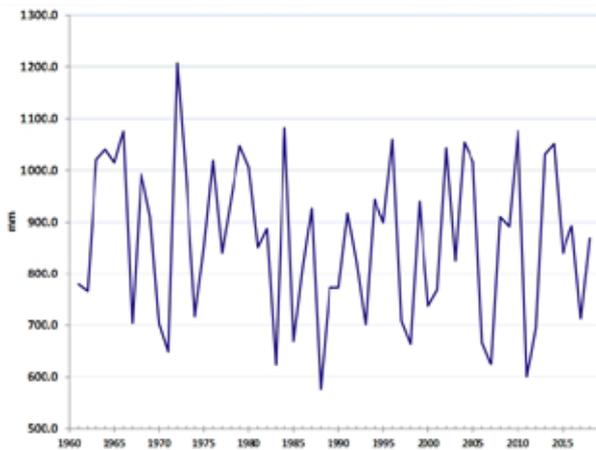
Precipitazioni cumulate medie annue:

periodo 1961 – 1990

periodo 1991 – 2018



Andamento temporale delle precipitazioni annue
media sulla Città metropolitana
periodo 1961 - 2018



Andamento temporale
delle anomalie di precipitazione
Estate



Quadro informativo

La variabilità spaziale della quantità annua di precipitazioni mostra valori compresi tra circa 600 mm/anno nella zona di pianura, fino a 1850 mm/anno nelle zone di montagna. Il confronto tra i due periodi climatici 1961 – 1990 e 1991 – 2018 mostra configurazioni abbastanza simili a livello annuo mentre sul lungo periodo non si evidenzia un segnale di tendenza statisticamente significativo.

Lo studio delle tendenze a livello stagionale sul periodo 1961-2018 ha mostrato una leggera diminuzione durante l'estate e un leggero aumento durante l'autunno.

L'ultimo grafico mostra come esempio l'andamento delle anomalie di precipitazioni estive calcolate rispetto al periodo 1961-1990. Da sottolineare il fatto che, anche se le tendenze sul lungo periodo non sono statisticamente significative, sono importanti anche i segnali di anomalia registrati nei diversi anni. Si nota come il 2012 e il 2017 sono stati caratterizzati da deficit di precipitazioni molto elevati così come sono evidenti gli anni con intense anomalie positive il 1995, il 2002. Il cambiamento nel regime di precipitazione è più evidente analizzando gli estremi di precipitazioni.

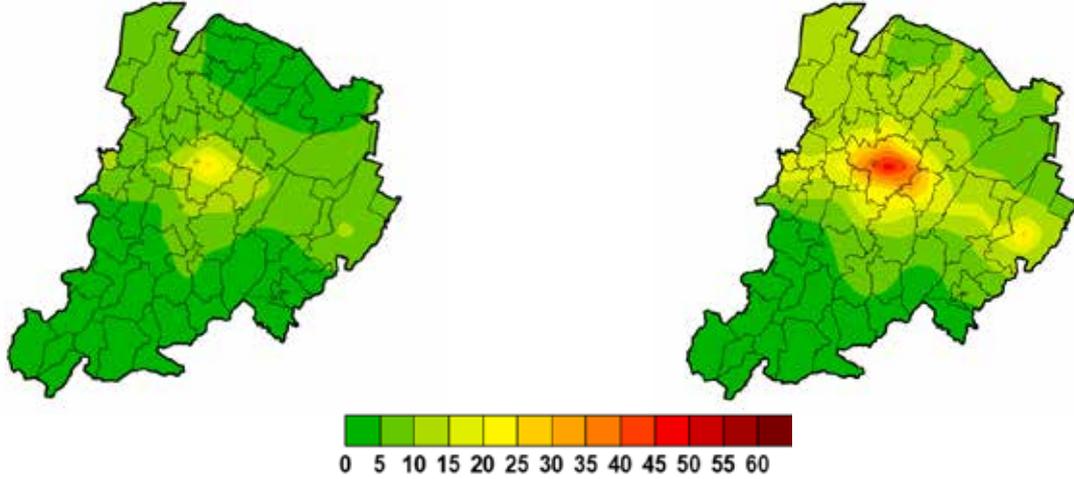
Profilo climatico osservato

Estremi climatici: temperatura e precipitazioni

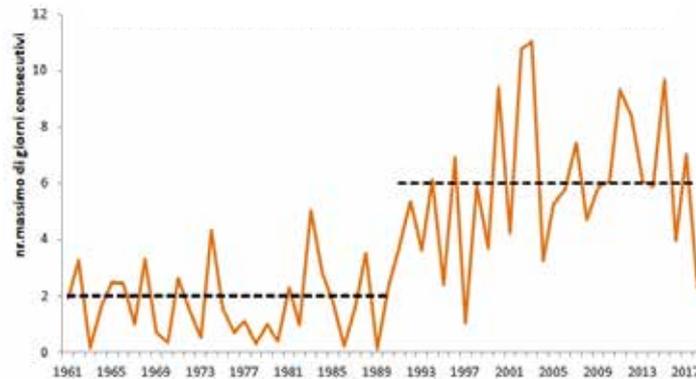
Distribuzione spaziale del numero annuo di notti tropicali

Notti tropicali: 1961-1990

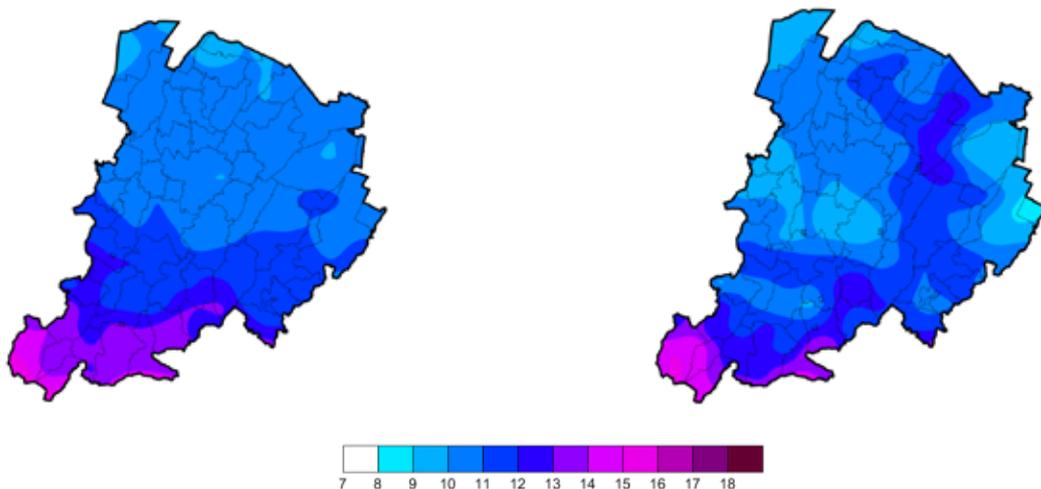
Notti tropicali: 1991-2018



Andamento temporale delle onde di calore estive sul periodo 1961-2018, media sulla Città metropolitana



Distribuzione spaziale della frequenza annua di eventi estremi



Numero di eventi annui di precipitazioni estreme 1961-1990

Numero di eventi annui di precipitazioni estreme 1991-2018

Quadro informativo

I cambiamenti nei valori medi stagionali di temperatura minima e massima si ritrovano anche negli estremi di temperatura. Le notti tropicali, la durata delle onde di calore, il numero di giorni con il gelo sono indicatori climatici analizzati sul lungo periodo sia a livello annuo che stagionale.

Lo studio preliminare ha evidenziato per il numero di notti tropicali, cioè il numero di notti con la temperatura minima superiore a 20 °C un aumento nel periodo 1991-2018 rispetto al periodo 1961-1990. Nel periodo 1961-1990, infatti, i valori dell'indicatore oscillavano tra 5 e 25 notti tropicali, mentre nel periodo 1991-2018 si nota un aumento fino a 50 notti tropicali in corrispondenza dell'area urbana centrale. Inoltre, la distribuzione spaziale evidenzia soprattutto nel periodo 1991-2018 anche aumento nella fascia urbanizzata della via Emilia.

Un segnale simile è stato identificato anche nell'andamento della durata delle onde di calore estive, definite come il numero massimo di giorni consecutivi in cui la temperatura massima estiva supera il 90mo percentile giornaliero calcolato sul periodo di riferimento 1961-1990. Il grafico mostra l'andamento delle onde di calore estive sul periodo 1961-2018, segnale mediato sulla Città metropolitana. Si nota una tendenza all'aumento sul lungo periodo e un cambiamento significativo dopo il 1990.

Anche negli estremi di precipitazione sono stati evidenziati dei cambiamenti sia a livello annuo che stagionale. Ad esempio, la distribuzione spaziale del numero di giorni in cui la precipitazione eccede il 90° percentile mostra un elevato numero di eventi soprattutto nell'Appennino, ma anche un aumento in pianura e in direzione Sud – Est soprattutto nel periodo 1991-2018. A livello stagionale invece, il numero massimo di giorni consecutivi senza precipitazione ha evidenziato un aumento durante l'estate e una diminuzione durante l'autunno.

FONTI DELLE INFORMAZIONI

I dati climatici utilizzati per lo studio della variabilità climatica osservata sulla città metropolitana di Bologna provengono dall'archivio climatico ERG5 – Eraclito (versione 4.2), che copre tutta la regione Emilia-Romagna.

Il data set è ottenuto tramite interpolazione spaziale su una griglia regolare a partire dai valori rilevati dalla rete delle stazioni meteorologiche storiche di temperatura (circa 40 stazioni) e di precipitazioni (circa 250 stazioni). La risoluzione del data set è di circa 5x5km e include dati giornalieri di temperatura e precipitazioni sul periodo 1961 – 2018. Da questo data set regionale sono stati selezionati i punti di griglia che ricadono all'interno della città metropolitana di Bologna, per i quali sono stati calcolati gli indicatori climatici stagionali e annuali per la descrizione della variabilità climatica.

Profilo climatico futuro

Temperatura

Figura 1 **Distribuzione geografica della temperatura media annua.**
Per il periodo 2021-2050 è stato riportato il valore medio dell'ensemble delle proiezioni.

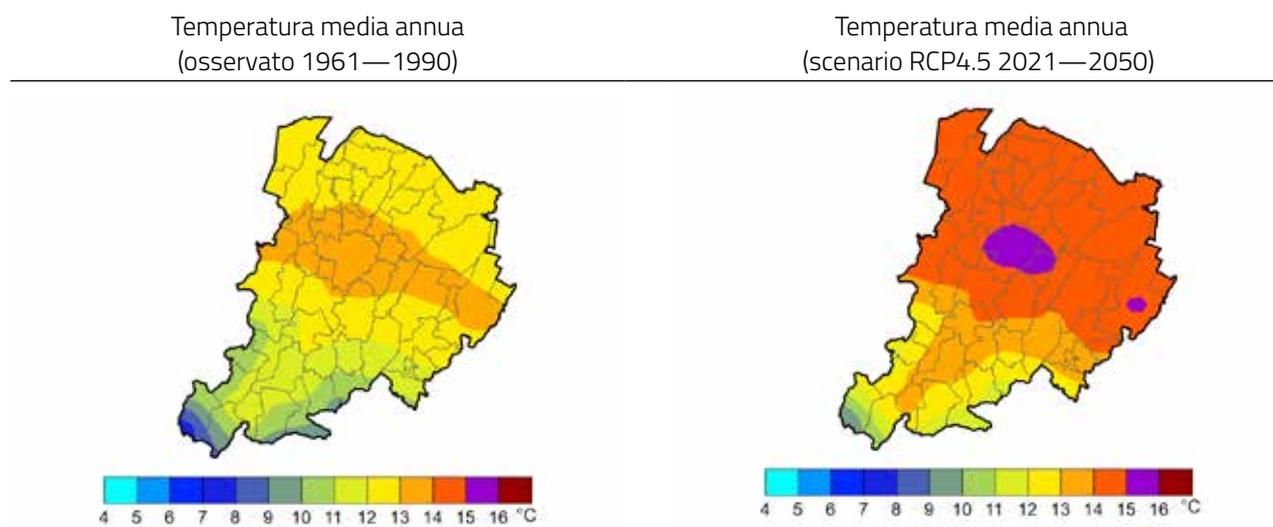


Figura 2 **Distribuzione geografica della temperatura massima estiva.**
Per il periodo 2021-2050 è stato riportato il valore medio dell'ensemble delle proiezioni.

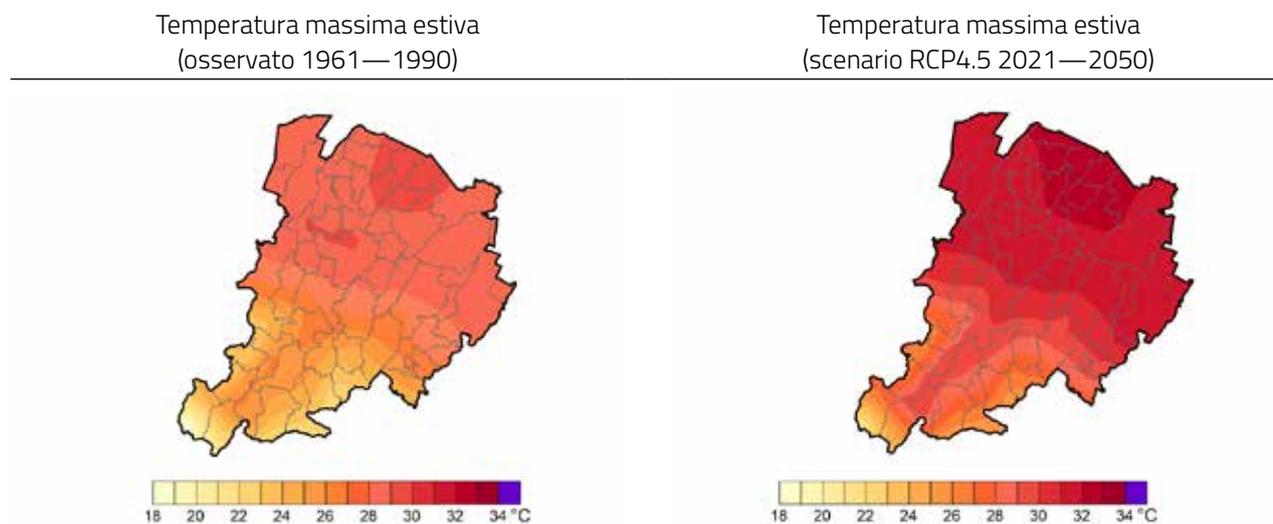


Tabella 1 **Proiezioni dei cambiamenti della temperatura media stagionale per il 2021-2050 (poor man ensemble - scenario emissivo RCP4.5) rispetto al 1961-1990 sul territorio della Città metropolitana.**

	Inverno	Primavera	Estate	Autunno	Anno
Cambiamenti di temperatura media	1,3°C	1,6°C	2,4°C	1,6°C	1,7°C

Quadro informativo

Proiezioni di cambiamento climatico

Per il periodo 2021-2050 gli scenari mostrano, con un certo grado di incertezza, un aumento della temperatura media annua su tutto il territorio metropolitano. Nella figura 1 è riportata la distribuzione geografica della temperatura media annua nei due periodi considerati. Si nota uno spostamento dei valori da 7°C a 9°C nella fascia appenninica e da 13°C a 15°C nella pianura, ma nelle aree urbane di Bologna e Imola l'aumento risulterebbe ancora più consistente e i valori arrivare fino a 16°C, comportando un evidente fenomeno di isola di calore.

Nella tabella 1 sono riportate le proiezioni dei cambiamenti climatici della temperatura media per le diverse stagioni, calcolate come media dei valori nei punti di griglia localizzati sul territorio della Città metropolitana. Si nota un probabile aumento della temperatura

media in tutte le stagioni, con un cambiamento annuo di +1,7°C. Per l'estate il segnale è più intenso. Un'analisi più dettagliata delle proiezioni stagionali ha evidenziato che questo segnale intenso determinato per la stagione estiva è dovuto principalmente al cambiamento dei valori massimi.

Nella figura 2 è riportata la distribuzione geografica della temperatura massima estiva per i due periodi in esame. Il valore medio potrebbe passare da 27°C a 29°C ma per la pianura questo aumento risulterebbe ancora più marcato, passando da 29°C a 32°C.

È, infine, importante sottolineare che il segno del cambiamento è risultato positivo e concorde per tutte le proiezioni relative ai singoli modelli climatici presi in esame, anche se di intensità diverse.

Profilo climatico futuro

Precipitazioni

Figura 1 Distribuzione geografica della precipitazione cumulata annua.
Per il periodo 2021-2050 è stato riportato il valore medio dell'ensemble delle proiezioni.

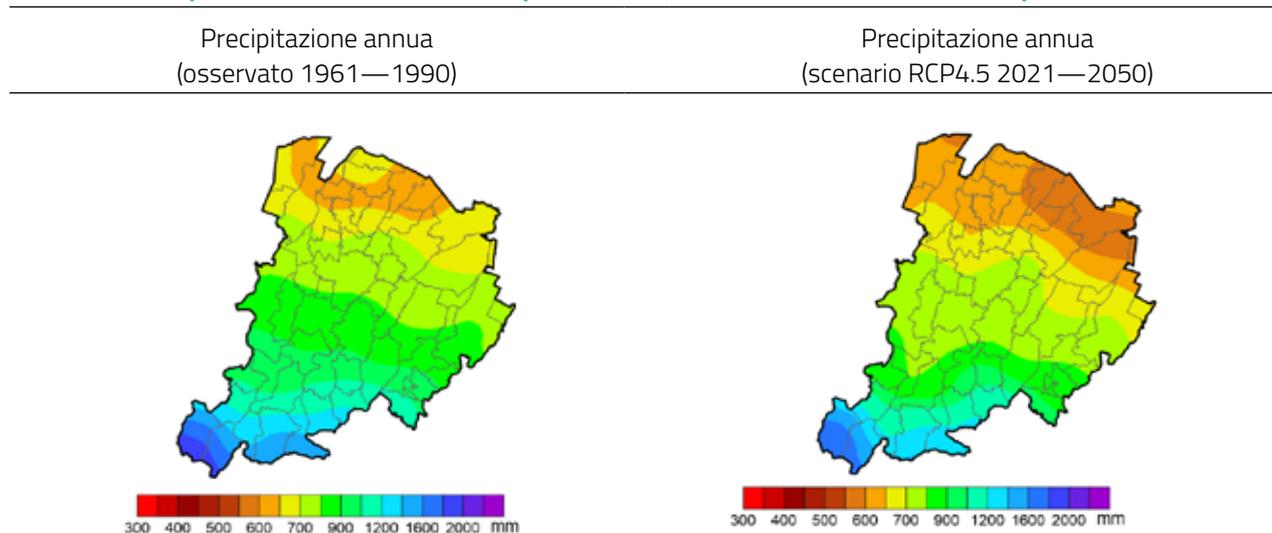


Tabella 1 Valore cumulato medio della precipitazione sul territorio della Città metropolitana (in mm).
Per il periodo 2021-2050 è stato riportato il valore medio e l'intervallo di confidenza dell'ensemble delle proiezioni calcolate con lo scenario emissivo RCP4.5.

Precipitazione (mm)	Inverno	Primavera	Estate	Autunno	Anno
1961-1990	200	230	180	260	870
2021-2050	190 (± 20)	170 (± 35)	160 (± 20)	275 (± 25)	795 (± 100)

Quadro informativo

Proiezioni di cambiamento climatico

Per il periodo 2021-2050 gli scenari mostrano, con un certo grado di incertezza, sul territorio della Città metropolitana una diminuzione media della quantità di precipitazione annua di circa il 10%. Come si può notare nella figura 1, il calo delle precipitazioni riguarda principalmente le aree di pianura fino alla media montagna. Nella tabella 1 sono invece riportate anche le proiezio-

ni a livello stagionale. I risultati indicano in media una probabile diminuzione per l'inverno, la primavera e l'estate, mentre per la stagione autunnale è atteso, invece, un probabile aumento della precipitazione. Tuttavia, è importante sottolineare che per questo indicatore le proiezioni hanno un grado maggiore di incertezza.

Profilo climatico futuro

Eventi estremi di temperatura e precipitazione

Figura 1 **Distribuzione geografica del numero di notti tropicali in estate.**
Per il periodo 2021-2050 è stato riportato il valore medio dell'ensemble delle proiezioni.

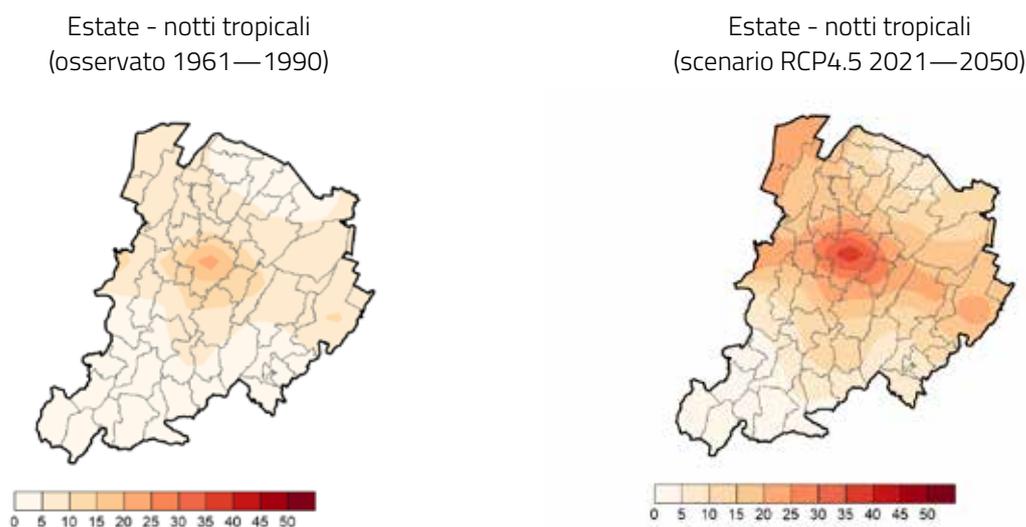
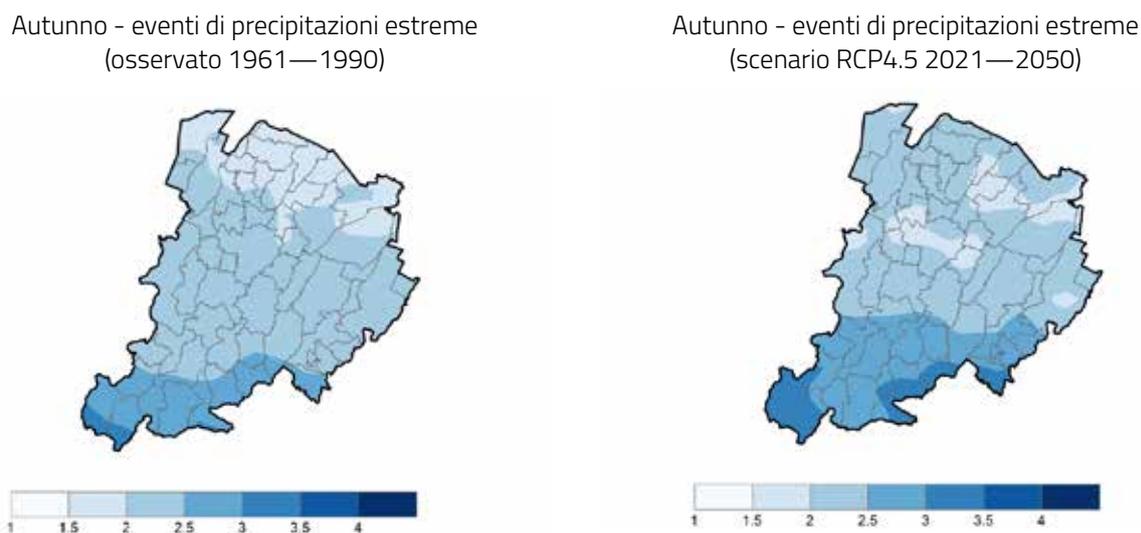


Figura 2 **Distribuzione geografica del numero degli eventi estremi di precipitazione in autunno.**
Per il periodo 2021-2050 è stato riportato il valore medio dell'ensemble delle proiezioni.



Quadro informativo

Proiezioni di cambiamento climatico

I fenomeni estremi relativi alla temperatura considerati in questo studio sono il numero delle notti tropicali e la durata delle onde di calore. Il numero delle notti tropicali è definito come il numero delle notti in cui la temperatura minima è superiore a 20°C. La durata delle onde di calore è definita, invece, come il numero *massimo dei giorni consecutivi* nei quali la temperatura è superiore al 90esimo percentile della distribuzione della temperatura massima.

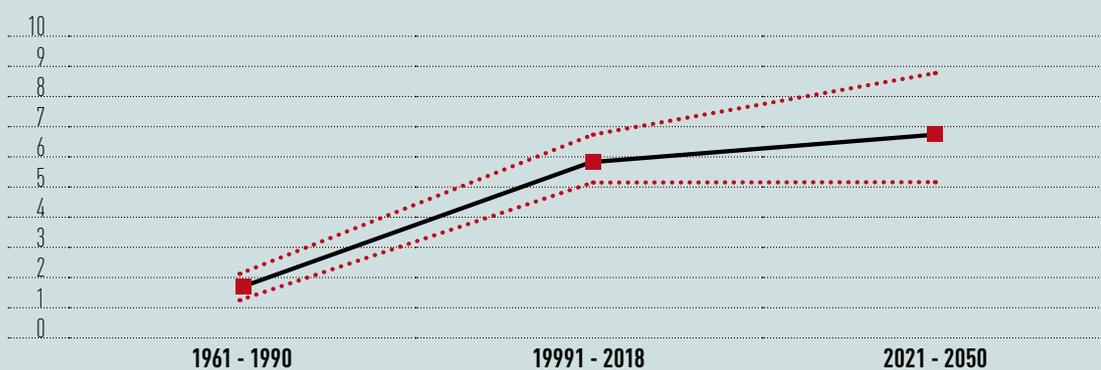
Per il periodo 2021-2050 gli scenari mostrano, con un certo grado di incertezza, un aumento medio di 8 notti tropicali su tutto il territorio metropolitano. Nella figura 1 è riportata la distribuzione geografica del numero di notti tropicali, dove si nota un probabile incremento fino a un massimo di 17 notti nell'area urbana del Comune di Bologna, rispetto al periodo di riferimento 1961-1990. Per la durata delle onde di calore le proiezioni mostrano un probabile aumento sia in pianura che nelle aree collinari e montane. Nella figura 2 sono riportati per la stagione estiva i valori medi sulla città metropolitana

della durata media delle onde di calore per vari orizzonti temporali: osservati 1961-1990, osservati 1991-2018 e proiezioni 2021-2050. La figura evidenzia un incremento da 2 a 6 giorni consecutivi per il periodo 1991-2018 e un ulteriore probabile aumento a circa 7 giorni consecutivi nel periodo 2021-2050. Inoltre, lo spread per il periodo 2021-2050 evidenzia anche la possibilità di arrivare a una durata media delle onde di calore fino a circa 9 giorni consecutivi.

Come fenomeno estremo di precipitazione è stato considerato il numero di giorni con precipitazione giornaliera superiore al 90esimo percentile della distribuzione relativa al periodo 1961-1990. Nella figura 3 le proiezioni per il 2021-2050 indicano per la stagione autunnale un probabile aumento sui rilievi e sulla parte settentrionale della pianura, con un aumento medio su tutto il territorio della Città metropolitana di circa il 10%. Tuttavia, è importante sottolineare che per questo indicatore le proiezioni hanno un grado maggiore di incertezza.

Figura 3 Andamento della durata media delle onde di calore in estate

Per ciascun periodo osservato sono riportati il valore medio della distribuzione statistica (quadrato rosso) e il suo intervallo di confidenza (probabilità < 0,05); per lo scenario futuro è riportato la media (quadrato rosso) e il valore minimo e massimo dell'ensemble delle proiezioni.





Dati e metodi

La scheda riporta i risultati dello studio climatologico sui cambiamenti attesi per il periodo dal 2021 al 2050 sul territorio della Città metropolitana di Bologna elaborato da ARPAE – Osservatorio idro metro clima.

In analogia a quanto fatto per lo studio relativo alla strategia di mitigazione e adattamento per i cambiamenti climatici della Regione Emilia-Romagna, i risultati sono stati ottenuti con lo scenario emissivo di stabilizzazione, denominato Representative Concentration Pathways (RCP) 4.5, secondo il quale, a fine secolo, sarebbero previste concentrazioni totali di gas serra equivalenti a una concentrazione di diossido di carbonio pari a 630 ppm.

Lo studio è stato condotto utilizzando il modello di regionalizzazione statistica CCAReg, sviluppato da Arpae-Simc (Tomozeiu et al., 2017). In termini generali, questo modello si basa su due step procedurali. Il primo di questi è un'applicazione della tecnica statistica delle correlazioni canoniche che consente di individuare, per il periodo di setup, diverse coppie di pattern atmosferici e di pattern al suolo per le quali è massima la correlazione. I pattern atmosferici considerati sono le re-analyses ERA-40 dell'Ecmwf (<https://apps.ecmwf.int/archive-catalogue/>), mentre i pattern al suolo sono costruiti con i dati del *dataset* Eraclito di Arpae-Simc (versione 4.2), disposti su una griglia regolare avente una risoluzione di 5x5 km ed estesa su tutto il territorio regionale (Antolini et al., 2015). Per la modellazione

delle proiezioni dei cambiamenti climatici, invece, il secondo step procedurale prevede la combinazione, mediante un modello di tipo *perfect prog*, delle coppie di pattern risultate statisticamente significative con le simulazioni dei pattern atmosferici futuri di un modello climatico globale o regionale. In questo studio sono state prese in esame le simulazioni future dei modelli climatici globali afferenti al Coupled Model Intercomparison Project 5 (Cmip5) del World Climate Research Programme (<https://esgf-node.llnl.gov/projects/cmip5/>).

Per avere una maggiore robustezza statistica, i cambiamenti ottenuti con CCAReg per ciascuno dei modelli climatici del progetto Cmip5 sono stati combinati insieme con la tecnica del *poor man ensemble*, che consiste per il calcolo del valore medio nel considerare tutte le proiezioni equivalenti in termini ponderali. I risultati riportati di seguito si riferiscono, perciò, alla media aritmetica dei diversi cambiamenti.

Le proiezioni dei cambiamenti futuri sono costruite a livello stagionale, dove le stagioni sono definite in questo modo: dicembre, gennaio, febbraio (inverno), marzo, aprile, maggio (primavera), giugno, luglio, agosto (estate), ottobre, novembre e dicembre (autunno). Il cambiamento annuale è ricavato come media dei valori stagionali.

Il periodo climatico di riferimento rispetto al quale sono calcolati i cambiamenti va dal 1961 al 1990.

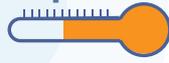
Ringraziamenti

We acknowledge the World Climate Research Programme's Working Group on Coupled Modelling, which is responsible for CMIP, and we thank the climate modelling groups for producing and making available their model output. For CMIP the U.S. Department of Energy's Program for Climate Model Diagnosis and Intercomparison provides coordinating support and led development of software infrastructure in partnership with the Global Organization for Earth System Science.

Bibliografia

- Antolini G., Auteri L., Pavan V., Tomei F., Tomozeiu R., Marletto V. (2015). A daily high-resolution gridded climatic data set for Emilia-Romagna, Italy, during 1961–2010 International Journal of Climatology 08/2015; DOI:10.1002/joc.4473.
- Tomozeiu R., Pasqui M., Quaresima S. (2017). Future changes of air temperature over Italian areas: a statistical downscaling technique applied to 2021–2050 and 2071–2100 periods. Meteorology and Atmospheric Physics, doi.org/10.1007/s00703-017-0536-7.

Proiezioni climatiche Città metropolitana di Bologna



TEMPERATURA MEDIA STAGIONALE (°C)

Periodo di riferimento:
1961-1990

Scenario emissivo:
RCP 4.5

Periodo di proiezione:
2021-2050

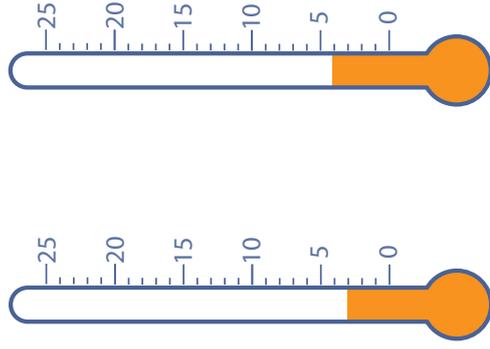
Fonte dati:
Dataset Eraclito v. 4.2

Metodo di elaborazione:
Regionalizzazione statistica applicata a modelli climatici globali

arpae
Agenzia regionale
per l'ambiente
emilia-romagna



1961-1990 2021-2050

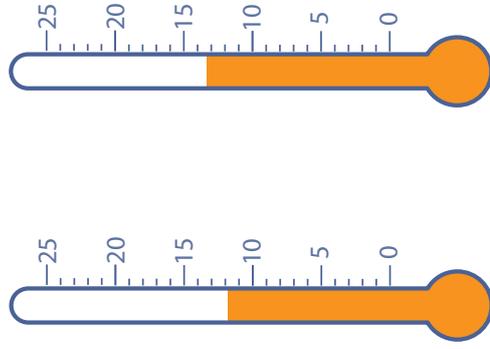


3 °C 4,3 °C



INVERNO

1961-1990 2021-2050

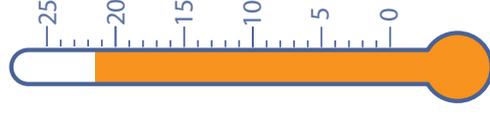


11,7 °C 13,3 °C

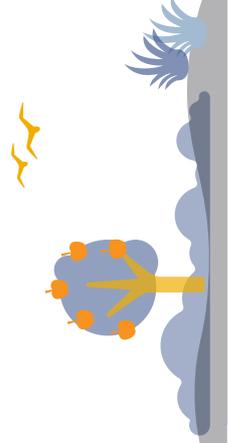


PRIMAVERA

1961-1990 2021-2050

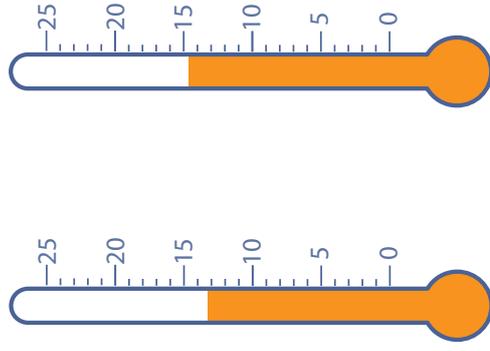


21,4 °C 23,8 °C



ESTATE

1961-1990 2021-2050



13,2 °C 14,8 °C



AUTUNNO

Proiezioni climatiche Città metropolitana di Bologna

PRECIPITAZIONE STAGIONALE (mm)

Periodo di riferimento:
1961-1990

Periodo di proiezione:
2021-2050

Scenario emissivo:
RCP 4.5

Fonte dati:
Dataset Eraclito v. 4.2

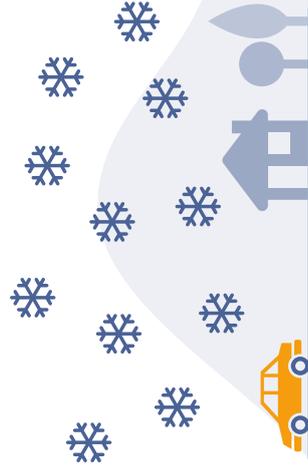
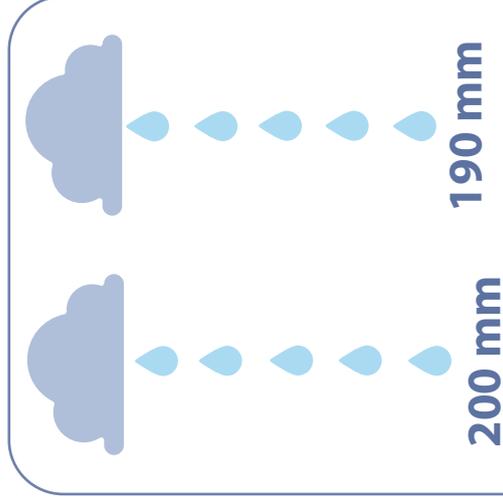
Metodo di elaborazione:
Regionalizzazione statistica applicata a modelli climatici globali

arpae

ARPAE
Agenzia Regionale
Protezione
Ambiente
Emilia-Romagna

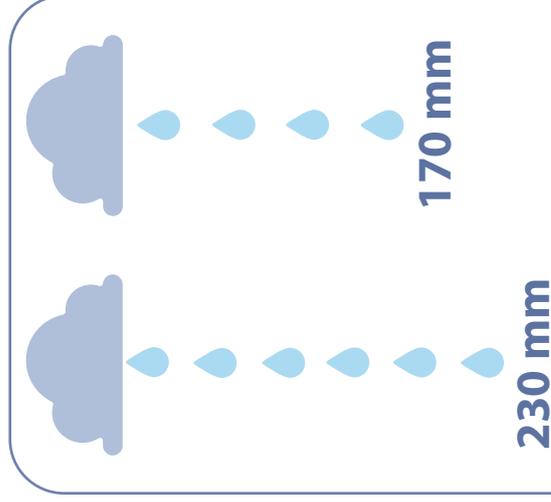
osservatorio clima
emilia-romagna

1961-1990 2021-2050



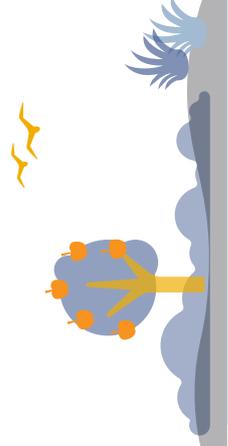
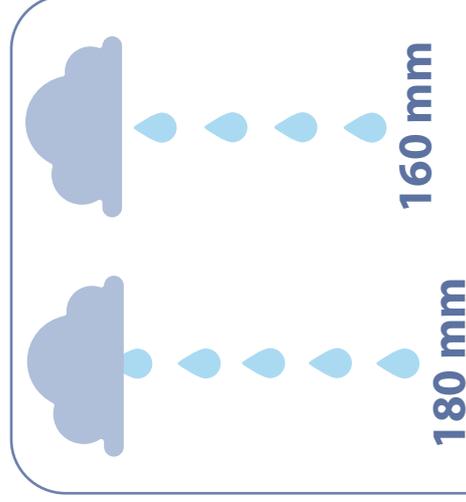
INVERNO

1961-1990 2021-2050



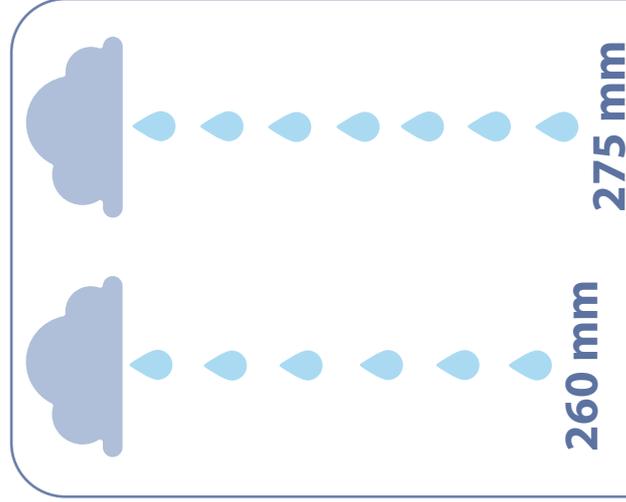
PRIMAVERA

1961-1990 2021-2050



ESTATE

1961-1990 2021-2050



AUTUNNO