

APPENDICE D – NOTA METODOLOGICA

D.1 Metodologie di calcolo degli indicatori climatici del Database

Gli indicatori climatici presenti nel Database ClimaMi sono stati calcolati, per ognuna delle 21 stazioni di progetto, a partire da dati rilevati a 10 minuti dalla rete di stazioni meteorologiche di proprietà di Fondazione OMD, per il periodo 1 dicembre 2012 - 30 novembre 2020 (8 anni); solo per le stazioni di Rho e Milano Sarpi il periodo di riferimento è ridotto (essendo state installate successivamente) ed è rispettivamente 1 dicembre 2014 - 30 novembre 2020 (6 anni) e 1 dicembre 2015 - 30 novembre 2020 (5 anni).

Per il calcolo di alcuni indicatori sono stati utilizzati i dati a 10 minuti stessi; per altri indicatori sono stati utilizzati i dati medi (o estremi) giornalieri.

- Per quanto riguarda gli indicatori climatici che si riferiscono a valori estremi (massime e minime assolute, massime consecutività) sono stati considerati gli **estremi assoluti rilevati sugli anni di progetto**, per ogni dettaglio temporale considerato
- Negli altri casi gli indicatori sono stati elaborati come **medie sui differenti periodi temporali** (decadale, mensile, stagionale, annuale, stagioni termiche), **mediando sugli anni di progetto**.

Nel caso degli indicatori ricavati per i CLINO di Milano Centro, le metodologie di calcolo sono analoghe, ma il dataset utilizzato per i calcoli corrisponde ai trentenni 1961-1990 e 1991-2020 della stazione di Milano Centro.

Di seguito l'elenco completo degli indicatori e delle rispettive metodologie di calcolo:

- *Temperatura media (°C)*: calcolata a partire dai valori di temperatura media giornaliera; quest'ultima, a sua volta, è ricavata dai dati medi di temperatura a 10 minuti (la media giornaliera deriva quindi da 144 valori)
- *Temperatura massima assoluta (°C)*: il massimo valore di temperatura rilevato in un determinato periodo temporale
- *Temperatura minima assoluta (°C)*: il minimo valore di temperatura rilevato in un determinato periodo temporale
- *Temperatura media delle massime giornaliere (°C)*: calcolata mediando i valori di temperatura massimi giornalieri rilevati in un determinato periodo temporale (ad esempio: la media delle massime di luglio è calcolata a partire dalle massime giornaliere di tutti i 31 giorni di luglio per tutti i mesi di luglio appartenenti al periodo di studio del progetto)
- *Temperatura media delle minime giornaliere (°C)*: calcolata mediando i valori di temperatura minimi giornalieri rilevati in un determinato periodo temporale (ad esempio: la media delle

minime di gennaio è calcolata a partire dalle minime giornaliere di tutti i 31 giorni di gennaio per tutti i mesi di gennaio appartenenti al periodo di studio del progetto)

- *Giorno Medio temperatura oraria (°C)*: calcolato, per ogni mese, mediando tutti i dati medi di temperatura rilevati ad una determinata ora; il giorno medio di temperatura è rappresentato, quindi, da 24 valori, uno per ogni ora del giorno
- *Gradi Giorno Invernali (°C) - totale medio*: sommatoria, estesa ad un periodo convenzionale e mediata poi su tutti gli anni, delle sole differenze positive tra la temperatura dell'ambiente, fissata convenzionalmente a 20 °C, e la temperatura media esterna giornaliera

$$\text{Gradi Giorno} = \sum_1^n (20 - T_{\text{media}})$$

- *Gradi Giorno Estivi (°C) - totale medio*: sommatoria, estesa all'estate meteorologica e mediata poi sugli anni di progetto, delle sole differenze positive tra l'indice Humidex giornaliero e la temperatura di set point, fissata a 25 °C (UNI 10339, 10349)

$$\text{Gradi Giorno Estivi} = \sum_1^n (\text{Humidex} - 25)$$

- *Giorni di Gelo (Temperatura minima < 0 °C) - N° medio*: numero medio, su un determinato periodo temporale, dei giorni con temperatura minima inferiore a 0 °C
- *Giorni di Gelo consecutivi (Temperatura minima < 0 °C) - N° massimo assoluto*: numero massimo assoluto raggiunto, su tutto il periodo di studio del progetto, di giorni consecutivi aventi temperatura minima inferiore a 0 °C
- *Giorni di Gelo consecutivi (Temperatura minima < 0 °C) - N° medio*: rappresenta la durata media, sugli anni di progetto, di una sequenza di giorni consecutivi con temperatura minima inferiore a 0 °C; è calcolata dividendo il numero totale di giorni di gelo per il numero di episodi costituito da uno o più giorni consecutivi con temperatura minima inferiore a 0 °C
- *Giorni di Gelo consecutivi (Temperatura minima < 0 °C) - distribuzione frequenza media*: frequenze di accadimento, mediate poi sugli anni di progetto, di uno o più giorni consecutivi con temperatura minima inferiore a 0 °C
- *Giorni di Ghiaccio (Temperatura massima < 0 °C) - N° medio*: numero medio, su un determinato periodo temporale, dei giorni con temperatura massima inferiore a 0 °C
- *Giorni di Ghiaccio consecutivi (Temperatura massima < 0 °C) - N° massimo assoluto*: numero massimo assoluto raggiunto, su tutto il periodo di studio del progetto, di giorni consecutivi aventi temperatura massima inferiore a 0 °C
- *Giorni di Ghiaccio consecutivi (Temperatura massima < 0 °C) - N° medio*: rappresenta la durata media, sugli anni di progetto, di una sequenza di giorni consecutivi con temperatura

massima inferiore a 0 °C; è calcolata dividendo il numero totale di giorni di ghiaccio per il numero di episodi costituito da uno o più giorni consecutivi con temperatura massima inferiore a 0 °C

- *Giorni di Ghiaccio consecutivi (Temperatura massima < 0 °C) - distribuzione frequenza media:* frequenze di accadimento, mediate poi sugli anni di progetto, di uno o più giorni consecutivi con temperatura massima inferiore a 0 °C
- *Giorni di Calura (Temperatura massima > 30 °C) - N° medio:* numero medio, su un determinato periodo temporale, dei giorni con temperatura max maggiore di 30 °C
- *Giorni di Calura consecutivi (Temperatura massima > 30 °C) - N° massimo assoluto:* numero massimo assoluto raggiunto, su tutto il periodo di studio del progetto, di giorni consecutivi aventi temperatura massima superiore a 30 °C
- *Giorni di Calura consecutivi (Temperatura massima > 30°C) - N° medio:* rappresenta la durata media, sugli anni di progetto, di una sequenza di giorni consecutivi con temperatura massima superiore a 30 °C; è calcolata dividendo il numero totale di giorni di calura per il numero di episodi costituito da uno o più giorni consecutivi con temperatura massima superiore a 30 °C
- *Giorni di Calura consecutivi (Temperatura massima > 30 °C) - distribuzione di frequenza media:* frequenze di accadimento, mediate poi sugli anni di progetto, di uno o più giorni consecutivi con temperatura massima superiore a 30 °C
- *Notti Tropicali (Temperatura minima > 20 °C) - N° medio:* numero medio, su un determinato periodo temporale, dei giorni con temperatura minima superiore a 20 °C
- *Notti Tropicali consecutive (Temperatura minima > 20 °C) - N° massimo assoluto:* numero massimo assoluto raggiunto, su tutto il periodo di studio del progetto, di giorni consecutivi aventi temperatura minima superiore a 20 °C
- *Notti Tropicali consecutive (Temperatura minima > 20 °C) - N° medio:* rappresenta la durata media, sugli anni di progetto, di una sequenza di giorni consecutivi con temperatura minima superiore a 20 °C; è calcolata dividendo il numero totale di notti tropicali per il numero di episodi costituito da uno o più giorni consecutivi con temperatura minima superiore a 20 °C
- *Notti Tropicali consecutive (Temperatura minima > 20 °C) - distribuzione di frequenza media:* frequenze di accadimento, mediate poi sugli anni di progetto, di uno o più giorni consecutivi con temperatura minima superiore a 20 °C
- *Giorni di Calura con Notti Tropicali (Temperatura massima > 30 °C e Temperatura minima > 20 °C) - N° medio:* numero medio, su un determinato periodo temporale, dei giorni

contemporaneamente con temperatura minima superiore a 20 °C e temperatura massima superiore a 30 °C

- *Giorni di Calura con Notti Tropicali consecutivi (Temperatura massima > 30 °C e Temperatura minima > 20 °C) - N° massimo assoluto*: numero massimo assoluto raggiunto, su tutto il periodo di studio del progetto, di giorni consecutivi aventi contemporaneamente temperatura minima superiore a 20 °C e temperatura massima superiore a 30 °C
- *Giorni di Calura con Notti Tropicali consecutivi (Temperatura massima > 30 °C e Temperatura minima > 20 °C) - N° medio*: rappresenta la durata media, sugli anni di progetto, di una sequenza di giorni consecutivi aventi contemporaneamente temperatura minima superiore a 20 °C e temperatura massima superiore a 30 °C; è calcolata dividendo il numero totale di giorni di calura/tropicali per il numero di episodi costituito da uno o più giorni consecutivi aventi contemporaneamente temperatura minima superiore a 20 °C e temperatura massima superiore a 30 °C
- *Giorni di Calura con Notti Tropicali consecutivi (Temperatura massima > 30 °C e Temperatura minima > 20 °C) - distribuzione frequenza media*: frequenze di accadimento, mediate poi sugli anni di progetto, di uno o più giorni consecutivi aventi contemporaneamente temperatura minima superiore a 20 °C e temperatura massima superiore a 30 °C
- *Giorno con Temperatura massima > 33,1 °C, Temperatura minima > 23,2 °C (rif CLINO 61-90) - N° medio giorni*: numero medio, su un determinato periodo temporale, dei giorni contemporaneamente con temperatura minima superiore a 23,2 °C e temperatura massima superiore a 33,1 °C (tali valori di temperatura minima e massima rappresentano i 95-esimi percentili delle temperature minime e massime del trimestre estivo per il trentennio 1961-1990)
- *Giorni con Temperatura massima > 33,1°C, Temperatura minima > 23,2°C (rif CLINO 61-90) consecutivi - N° massimo assoluto*: numero massimo assoluto raggiunto, su tutto il periodo di studio del progetto, di giorni consecutivi aventi contemporaneamente temperatura minima superiore a 23,2 °C e temperatura massima superiore a 33,1 °C (tali valori di temperatura minima e massima rappresentano i 95-esimi percentili delle temperature minime e massime del trimestre estivo per il trentennio 1961-1990)
- *Giorni con Temperatura massima > 33,1 °C, Temperatura minima > 23,2 °C (rif CLINO 61-90) consecutivi - N° medio*: rappresenta la durata media, sugli anni di progetto, di una sequenza di giorni consecutivi aventi contemporaneamente temperatura minima superiore a 23,2 °C e temperatura massima superiore a 33,1 °C; è calcolata dividendo il numero totale di giorni superanti tali soglie per il numero di episodi costituito da uno o più giorni consecutivi aventi

contemporaneamente temperatura minima superiore a 23,2 °C e temperatura massima superiore a 33,1 °C

- *Ondata di Calore (giorno con Temperatura massima > 33,1°C, Temperatura minima > 23,2°C per almeno 2 gg consecutivi - rif CLINO 61-90) - distribuzione frequenza media:* frequenze di accadimento, mediate poi sugli anni di progetto, di due o più giorni consecutivi aventi contemporaneamente temperatura minima superiore a 23,2 °C e temperatura massima superiore a 33,1 °C (tali valori di temperatura minima e massima rappresentano i 95-esimi percentili delle temperature minime e massime del trimestre estivo per il trentennio 1961-1990)
- *Humidex medio giornaliero (°C):* calcolato a partire dai dati orari di temperatura (T) e umidità (UR), utilizzando la seguente formula semi-empirica:

$$\text{Humidex} = T + \frac{5}{9} * (6.11 * \frac{UR}{100} * 10^{\frac{7,5*T}{237,7+T}} - 10)$$

Dalla media dei 24 dati orari di Humidex viene ricavato l'Humidex medio giornaliero.

- *Humidex massimo assoluto - valore orario (°C):* il massimo valore di Humidex orario calcolato nelle stagioni termiche estive di progetto
- *Humidex medio dei massimi assoluti annuali (°C):* valore ottenuto dalla media degli Humidex massimi di ogni estate meteorologica
- *Giorni con Humidex orario ≥ 40 °C - N° medio:* numero dei giorni, mediato sulle stagioni di progetto, in cui l'Humidex ha raggiunto i 40 °C per almeno un'ora
- *Ore con Humidex ≥ 40 °C - N° medio:* numero di ore, mediato sulle stagioni di progetto, in cui l'Humidex ha raggiunto i 40 °C
- *Giorni con Humidex orario ≥ 35 °C - N° medio:* numero dei giorni, mediato sulle stagioni di progetto, in cui l'Humidex ha raggiunto i 35 °C per almeno un'ora
- *Ore con Humidex ≥ 35 °C - N° medio:* numero di ore, mediato sulle stagioni di progetto, in cui l'Humidex ha raggiunto i 35 °C
- *Massima escursione giornaliera dell'aria esterna (°C):* massima differenza, in un determinato periodo, tra la temperatura massima giornaliera e la temperatura minima giornaliera

$$\text{Max}(T_{\text{max}} - T_{\text{min}})$$

- *Media delle massime escursioni giornaliere dell'aria esterna (°C):* per ogni dettaglio temporale considerato (decadale, mensile, stagionale, annuale) la media dei valori di massima escursione giornaliera di ogni anno considerato dal progetto
- *Somme Termiche a soglia 0 °C (°C):* sommatoria, estesa ad un determinato periodo, delle sole differenze positive tra la temperatura media giornaliera e una temperatura di 0 °C

$$\text{Somma termica soglia } 0^{\circ}\text{C} = \sum_1^n (T_{\text{media}} - 0)$$

- *Somme Termiche a soglia 5 °C (°C)*: sommatoria, estesa ad un determinato periodo, delle sole differenze positive tra la temperatura media giornaliera e una temperatura di 5 °C

$$\text{Somma termica soglia } 5^{\circ}\text{C} = \sum_1^n (T_{\text{media}} - 5)$$

- *Somme Termiche a soglia 10 °C (°C)*: sommatoria, estesa ad un determinato periodo, delle sole differenze positive tra la temperatura media giornaliera e una temperatura di 10 °C

$$\text{Somma termica soglia } 10^{\circ}\text{C} = \sum_1^n (T_{\text{media}} - 10)$$

- *Temperatura esterna invernale di progetto - edifici leggeri (°C)*: calcolata come l'1-esimo percentile delle temperature medie orarie rilevate nei mesi di inverno meteorologico degli anni di progetto
- *Temperatura esterna invernale di progetto - edifici normali/pesanti (°C)*: calcolata come il 2,5-esimo percentile delle temperature medie orarie rilevate nei mesi di inverno meteorologico degli anni di progetto
- *Umidità relativa media (%)*: calcolata a partire dai valori di umidità media giornaliera; quest'ultima, a sua volta, è ricavata dai dati medi di umidità a 10 minuti (la media giornaliera deriva quindi da 144 valori)
- *Umidità relativa massima assoluta (%)*: il massimo valore di umidità rilevato in un determinato periodo temporale
- *Umidità relativa minima assoluta (%)*: il minimo valore di umidità rilevato in un determinato periodo temporale
- *Umidità relativa media delle massime giornaliere (%)*: calcolata mediando i valori di umidità massimi giornalieri rilevati in un determinato periodo temporale (ad esempio: la media delle massime di luglio è calcolata a partire dalle massime giornaliere di tutti i 31 giorni di luglio per tutti i mesi di luglio appartenenti al periodo di studio del progetto)
- *Umidità relativa media delle minime giornaliere (%)*: calcolata mediando i valori di umidità minimi giornalieri rilevati in un determinato periodo temporale (ad esempio: la media delle minime di gennaio è calcolata a partire dalle minime giornaliere di tutti i 31 giorni di gennaio per tutti i mesi di gennaio appartenenti al periodo di studio del progetto)
- *Ore con Umidità relativa media < 10% - N° medio di accadimenti*: conteggio delle ore in cui l'umidità media oraria è stata al di sotto del 10%, mediate sugli anni di progetto

- *Ore con Umidità relativa media > 90% - N° medio di accadimenti*: conteggio delle ore in cui l'umidità media oraria è stata al di sopra del 90%, mediate sugli anni di progetto
- *Giorno Medio Umidità relativa oraria (%)*: calcolato, per ogni mese, mediando tutti i dati medi di umidità rilevati ad una determinata ora; il giorno medio di umidità è rappresentato, quindi, da 24 valori, uno per ogni ora del giorno
- *Pressione atmosferica media (hPa)*: calcolata a partire dai valori di pressione media giornaliera; quest'ultima, a sua volta, è ricavata dai dati medi di pressione a 10 minuti (la media giornaliera deriva quindi da 144 valori)
- *Giorno Medio Pressione atmosferica oraria (hPa)*: calcolato, per ogni mese, mediando tutti i dati medi di pressione rilevati ad una determinata ora; il giorno medio di pressione è rappresentato, quindi, da 24 valori, uno per ogni ora del giorno
- *Precipitazioni cumulate media (mm)*: calcolata a partire dai valori di precipitazione cumulata giornaliera; quest'ultima, a sua volta, è ricavata dalla somma dei dati di precipitazione a 10 minuti
- *Precipitazioni cumulate mediana (mm)*: calcolo della mediana a partire dai valori di precipitazione cumulata giornaliera; quest'ultima, a sua volta, è ricavata dalla somma dei dati di precipitazione a 10 minuti
- *Precipitazioni intensità media (mm/h)*: calcolata a partire dai valori di intensità media di precipitazione a 10 minuti; dal calcolo sono escluse le situazioni con intensità media di precipitazione uguale a 0 (precipitazioni assenti)
- *Precipitazioni intensità mediana (mm/h)*: calcolo della mediana a partire dai valori di intensità media di precipitazione a 10 minuti; dal calcolo sono escluse le situazioni con intensità media di precipitazione uguale a 0 (precipitazioni assenti)
- *Precipitazioni intensità massima assoluta (mm/h)*: il massimo valore di intensità massima di precipitazione rilevato in un determinato periodo temporale
- *Precipitazioni intensità media delle massime assolute (mm/h)*: calcolata mediando i valori di intensità massima di ogni singolo anno di progetto per un determinato dettaglio temporale
- *Giorni di pioggia (Precipitazioni ≥ 1 mm) - N° medio*: numero di giorni, mediato sugli anni di progetto, in cui si è registrata una precipitazione cumulata giornaliera di almeno 1 mm
- *Giorni di pioggia consecutivi (Precipitazioni ≥ 1 mm) - N° massimo assoluto*: numero massimo assoluto raggiunto, su tutto il periodo di studio del progetto, di giorni consecutivi con precipitazione cumulata giornaliera di almeno 1 mm

- *Giorni senza pioggia consecutivi (Precipitazioni < 1 mm) - N° massimo assoluto*: numero massimo assoluto raggiunto, su tutto il periodo di studio del progetto, di giorni consecutivi con precipitazione cumulata giornaliera assente o inferiore a 1 mm
- *Giorni di pioggia consecutivi (Precipitazioni >= 1 mm) - N° medio*: rappresenta la durata media, sugli anni di progetto, di una sequenza di giorni consecutivi con precipitazione cumulata giornaliera di almeno 1 mm; è calcolata dividendo il numero totale di giorni di pioggia per il numero di episodi costituito da uno o più giorni consecutivi con precipitazione cumulata giornaliera di almeno 1 mm
- *Giorni senza pioggia consecutivi (Precipitazioni < 1 mm) - N° medio*: rappresenta la durata media, sugli anni di progetto, di una sequenza di giorni consecutivi con precipitazione cumulata giornaliera assente o inferiore a 1 mm; è calcolata dividendo il numero totale di giorni senza pioggia per il numero di episodi costituito da uno o più giorni consecutivi con precipitazione cumulata giornaliera assente o inferiore a 1 mm
- *Giorni di pioggia consecutivi (Precipitazioni >= 1 mm) - distribuzione di frequenza media*: frequenze di accadimento, mediate poi sugli anni di progetto, di uno o più giorni consecutivi con precipitazione cumulata giornaliera di almeno 1 mm
- *Giorni senza pioggia consecutivi (Precipitazioni < 1 mm) - distribuzione di frequenza media*: frequenze di accadimento, mediate poi sugli anni di progetto, di uno o più giorni consecutivi con precipitazione cumulata giornaliera assente o inferiore a 1 mm
- *Eventi con Precipitazioni >= 5 mm in 10 minuti - N° medio di accadimenti*: numero di episodi in cui vi è stato un cumulo di precipitazioni di almeno 5 mm in 10 minuti, mediato sugli anni di progetto
- *Eventi con Precipitazioni >= 15 mm in 30 minuti - N° medio di accadimenti*: numero di episodi in cui vi è stato un cumulo di precipitazioni di almeno 15 mm in 30 minuti, mediato sugli anni di progetto
- *Eventi con Precipitazioni >= 30 mm in 60 minuti - N° medio di accadimenti*: numero di episodi in cui vi è stato un cumulo di precipitazioni di almeno 30 mm in 60 minuti, mediato sugli anni di progetto
- *Velocità del vento media (m/s)*: calcolata a partire dai valori di velocità media giornaliera del vento; quest'ultima, a sua volta, è ricavata dai dati medi di velocità a 10 minuti (la media giornaliera deriva quindi da 144 valori)
- *Velocità del vento mediana (m/s)*: calcolo della mediana a partire dai valori medi giornalieri di intensità del vento

- *Velocità del vento massima assoluta (m/s)*: il massimo valore di velocità del vento rilevato in un determinato periodo temporale
- *Velocità del vento media delle massime giornaliere (m/s)*: calcolata mediando i valori di velocità del vento massimi giornalieri rilevati in un determinato periodo temporale (ad esempio: la media delle massime di luglio è calcolata a partire dalle massime giornaliere di tutti i 31 giorni di luglio per tutti i mesi di luglio appartenenti al periodo di studio del progetto)
- *Giorno Medio Velocità del vento oraria (m/s)*: calcolato, per ogni mese, mediando tutti i dati medi di velocità del vento rilevati ad una determinata ora; il giorno medio di velocità del vento è rappresentato, quindi, da 24 valori, uno per ogni ora del giorno
- *Raffica massima assoluta (m/s)*: il massimo valore di raffica rilevato in un determinato periodo temporale
- *Raffica media (m/s)*: calcolata a partire dai valori di raffica media giornaliera; quest'ultima, a sua volta, è ricavata dai dati di raffica a 10 minuti (la media giornaliera deriva quindi da 144 valori)
- *Direzione prevalente del vento (°)*: calcolata come media pesata tra la direzione prevalente a 10 minuti e la rispettiva frequenza di accadimento
- *Rosa dei venti in 16 settori (%)*: calcolata a partire dai valori di direzione e velocità media del vento a 10 minuti; i 360 possibili valori di direzione del vento sono raggruppati in 16 settori di provenienza e, per ognuno di essi, è stata calcolata la percentuale di accadimento per diversi intervalli di velocità; il tutto è mediato sugli anni di progetto
- *Giorno Medio della Direzione risultante del vento oraria (°)*: calcolato, per ogni mese, mediando tutti i dati di direzione del vento rilevati ad una determinata ora; il giorno medio della direzione risultante del vento è rappresentato, quindi, da 24 valori, uno per ogni ora del giorno
- *Giorno Medio della Direzione prevalente del vento oraria (settori)*: calcolato, per ogni mese, a partire dai dati di direzione del vento, raggruppati in 16 settori di provenienza, ad una determinata ora; per ogni settore e per ogni ora sono calcolate le frequenze di accadimento: una frequenza di accadimento più elevata indica la direzione prevalente di una certa ora. Il giorno medio della direzione prevalente del vento è rappresentato, quindi, da 24 settori, uno per ogni ora del giorno e dalla rispettiva frequenza di accadimento
- *Eventi con raffica > 5 m/s su 10 minuti - N° medio di accadimenti*: calcolati utilizzando i dati di raffica a 10 minuti; numero di episodi in cui la raffica ha superato i 5 m/s, mediato sugli anni di progetto

- *Eventi con raffica > 10 m/s su 10 minuti - N° medio di accadimenti*: calcolati utilizzando i dati di raffica a 10 minuti; numero di episodi in cui la raffica ha superato i 10 m/s, mediato sugli anni di progetto
- *Eventi con raffica > 15 m/s su 10 minuti - N° medio di accadimenti*: calcolati utilizzando i dati di raffica a 10 minuti; numero di episodi in cui la raffica ha superato i 15 m/s, mediato sugli anni di progetto
- *Eventi con raffica > 20 m/s su 10 minuti - N° medio di accadimenti*: calcolati utilizzando i dati di raffica a 10 minuti; numero di episodi in cui la raffica ha superato i 20 m/s, mediato sugli anni di progetto
- *Radiazione solare globale media (W/m^2)*: calcolata a partire dai valori di radiazione solare globale media giornaliera; quest'ultima, a sua volta, è ricavata dai dati medi di radiazione solare globale a 10 minuti (la media giornaliera deriva quindi da 144 valori)
- *Giorno Medio radiazione solare globale oraria (W/m^2)*: calcolato, per ogni mese, mediando tutti i dati medi di radiazione solare globale rilevati ad una determinata ora; il giorno medio di radiazione solare globale è rappresentato, quindi, da 24 valori, uno per ogni ora del giorno
- *Radiazione solare globale massima assoluta (W/m^2)*: il massimo valore di radiazione solare globale rilevato in un determinato periodo temporale
- *Radiazione solare globale media delle massime giornaliere (W/m^2)*: calcolata mediando i valori di radiazione solare globale massimi giornalieri rilevati in un determinato periodo temporale (ad esempio: la media delle massime di luglio è calcolata a partire dalle massime giornaliere di tutti i 31 giorni di luglio per tutti i mesi di luglio appartenenti al periodo di studio del progetto)
- *Fulmini nube suolo - N° medio di colpi entro il comune per km^2* : numero di fulmini nube-suolo registrato nell'area comunale dal SIRF diviso per la superficie comunale e mediato sui 19 anni. L'indicatore in questione è l'unico a fare riferimento a un periodo di partenza di dati di 19 anni (2000-2018) (<https://www.fulmini.it/public/sirf/default.asp>)

D.2 Atlante Climatico della Temperatura dell'Aria

Area e metodologia di analisi

L'area considerata per la realizzazione delle mappe dell'Atlante Climatico è più estesa rispetto a quella del bacino aerologico milanese del Database: in particolare si espande a sud del comune di Pavia, sino al fiume Po.

Il dominio ha coordinate x (476.500 m, 5.477.000 m) e y (499.200 m, 5.059.800 m) nel sistema di riferimento EPSG 32632 ed è rappresentato da un reticolo di calcolo suddiviso in celle quadrate di lato di 100 metri.

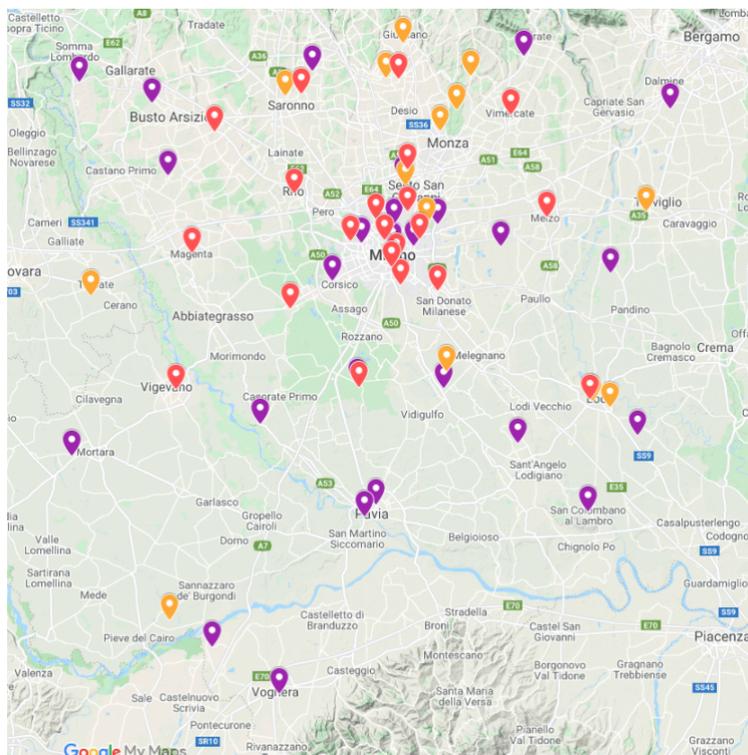


Figura D.2.1. Area e stazioni meteorologiche considerate nell'Atlante delle Temperature dell'Aria
(in rosso: Fondazione OMD, in viola: ARPA, in giallo: Meteonetwork)

Lo scopo dell'Atlante è quello di realizzare una **climatologia della temperatura dell'aria nel territorio in esame, dedicata** al fenomeno dell'**Isola di Calore UHI** e agli eventi estremi denominati **Ondate di Calore**. Si è dunque elaborata una **metodologia in grado di quantificare** questi fenomeni termici dal punto di vista delle **tipologie di distribuzione spaziale con associate intensità e frequenze**: tutte caratteristiche variabili in funzione della meteorologia. La quantificazione corretta

di tali caratteristiche è la discriminante per poter elaborare, a cascata, statistiche di tipo climatico, quali mappe medie ed estreme stagionali.

La metodologia elaborata implementa i seguenti passaggi:

1. Interpolazione con tecnica del Co-Kriging di dati di temperatura dell'aria monitorata da stazioni meteo al suolo e dati satellitari di Land Surface Temperature;
2. Individuazione e caratterizzazione statistica delle Situazioni Tipo Climatiche che danno luogo al fenomeno dell'Isola di Calore e degli episodi di Ondate di Calore nel territorio in esame;
3. Implementazione delle statistiche climatiche stagionali sulle mappe "orarie" di temperatura dell'aria, in funzione del passaggio 2.

Co-Kriging e dati di temperatura

La mappatura delle temperature dell'aria è stata implementata tramite la **tecnica del Co-Kriging**, un metodo di interpolazione statistica che appartiene alla famiglia dei metodi di stima lineare pesata [Dirk et al., 1998; Lynch, 2001; Zhao et al., 2005]: permette di utilizzare una variabile secondaria per stimare i valori della variabile di interesse. Tipicamente la variabile che si vuole stimare in tutti i punti della griglia, detta primaria, è sottocampionata rispetto alla variabile secondaria, della quale invece si hanno molte misurazioni. Per entrambe le variabili è necessario eseguire una analisi spaziale e si richiede che la variabile principale presenti una correlazione con quella secondaria (Wackernagel H., 2001).

Nello specifico caso dell'Atlante la **variabile primaria** è rappresentata dai dati di **temperatura dell'aria** in prossimità del suolo, mentre la **variabile secondaria** è la **Land Surface Temperature (LST)**, cioè la temperatura superficiale del suolo stesso.

Quali dati di temperatura dell'aria sono state utilizzate le misure di 61 stazioni meteorologiche distribuite sul territorio di interesse e ai suoi confini (Fig. D.2.1):

- 21 stazioni della rete di proprietà di Fondazione OMD (<https://www.fondazioneomd.it/climate-network>)
- 26 stazioni di ARPA Lombardia, stakeholder del progetto (https://www.arpalombardia.it/Pages/ARPA_Home_Page.aspx14)
- 14 stazioni dell'Associazione Meteonetwork (<https://www.meteonetwork.it/>), stakeholder del progetto

Da satellite è ricavabile il dato di **temperatura superficiale del suolo Land Surface Temperature LST**. Questo può essere calcolato con diversi metodi a partire dalle misure di radianza infrarossa in uno o due canali del satellite e da una serie di dati accessori.

I requisiti del progetto ClimaMi, per le applicazioni degli utenti cui ClimaMi si rivolge, sono:

- **risoluzione orizzontale inferiore o uguale a 100 metri;**
- **disponibilità di dati riferiti agli orari della giornata in cui il fenomeno dell'isola di calore è presente e possibilmente più marcato.**

Relativamente alla risoluzione temporale vi sono vincoli legati agli orari prefissati di passaggio dei satelliti sulla regione di interesse, in genere leggermente variabili in funzione degli specifici parametri orbitali.

L'effettiva disponibilità del dato LST è inoltre subordinata alla **totale assenza di nuvolosità** sull'area di interesse: la presenza anche di nuvole sottili e poco o affatto visibili, come cirri e cirrostrati o nebbie sull'area, compromette la misura satellitare.

Infine i dati devono coprire l'intero periodo di progetto o almeno buona parte dello stesso ed **essere rappresentativi di situazioni meteorologiche tipiche ben distinte**, definite a parte in modo indipendente a partire dai soli dati misurati "in situ" e **funzionali allo scopo progettuale** (isole di calore e ondate di calore nel caso del progetto ClimaMi).

Le piattaforme orbitali operative che soddisfano almeno in parte le esigenze di cui sopra e che consentono un facile accesso ai dati e la loro successiva elaborazione nei tempi brevi del progetto sono:

- a. Sentinel-3⁴⁷, operato da ESA nel quadro dell'iniziativa europea Copernicus⁴⁸ (sia il 3A che il gemello 3B, nel seguito denominati SEN3), che fornisce direttamente un prodotto LST calcolato con il metodo della Split Window (SW) a partire dalla primavera del 2016; è caratterizzato da una bassa risoluzione spaziale (1km);
- b. Landsat-8 (nel seguito LDT8), lanciato da NOAA per la gestione da parte di USGS, che non fornisce direttamente LST⁴⁹ ma gode di una risoluzione di 100 m nell'infrarosso e 30 m nel visibile ed è operativo dal 2013.

Le elaborazioni sono diverse nei due casi, ma in prima battuta riguardano sempre il **ritaglio sull'area di progetto e la trasformazione al sistema di geo-referenziazione UTM/WGS84**. Mentre nel caso del SEN3 queste operazioni portano immediatamente al risultato di un campo LST, nel caso del LDT8 il campo deve essere poi calcolato a partire dai dati grezzi di radianza in diversi canali spettrali.

Il ritaglio sull'area di progetto e la georeferenziazione richiesta sono possibili in entrambi i casi attraverso l'applicazione SNAP, resa disponibile dall'ESA e liberamente scaricabile⁵⁰.

⁴⁷ <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-3>

⁴⁸ https://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/Copernicus

⁴⁹ La disponibilità di LST già elaborata è prevista a partire dalla seconda metà del 2020 a scala globale

⁵⁰ <http://step.esa.int/main/download/snap-download/>

a. Sentinel-3

La procedura prevede, a partire dal file dati scaricato dell'intera orbita interessante l'area, due diverse fasi:

- la creazione di un ritaglio ("subset") per il quale è possibile specificare i limiti geografici in termini di latitudine e longitudine. La scelta adottata è:
 - Limite Sud: 45,0°; limite Nord: 46,0°; Limite Ovest: 8,0°; limite Est: 10,0°
che copre completamente l'area di progetto;
- la trasformazione del subset ottenuto correggendo per l'inclinazione rispetto al nadir osservativo con georeferenziazione nel sistema UTM/WGS84.

Il file risultante, di dimensioni sensibilmente inferiori rispetto all'originale, comprende dati di diversa natura, tra cui il campo LST e le diverse "cloud masks" che sono essenziali per valutare l'utilizzabilità dei dati in funzione della presenza di nubi. I dati LST vengono poi esportati nel formato NetCDF, richiesto per le successive attività di progetto, e anche come immagine in formato grafico per documentazione e verifica (in questo caso con l'eventuale sovrapposizione del reticolo geografico e dei confini comunali dell'area per una maggiore leggibilità). Sono comunque possibili anche altre tipologie di esportazione (ad esempio per la visualizzazione in Google Earth).

b. Landsat-8

La procedura di prima elaborazione, anche in questo caso eseguita con l'applicativo SNAP, è analoga a quella del SEN3 ma con alcune differenze dovute alla diversa organizzazione dei dati.

Vista la perdurante indisponibilità dei dati LST sull'area esterna agli USA (almeno a tutto ottobre 2020), è stato necessario procedere autonomamente al calcolo partendo dai dati grezzi dei diversi canali. Allo scopo, dopo una estensiva rassegna della letteratura scientifica in materia (Wang et al., 2019; Garcia-Santos et al., 2018), è stato prescelto il **metodo Split Window (SW)**, che utilizza sia due canali infrarossi dello strumento TIRS (B10 e B11) sia 4 canali nella banda del visibile dello strumento OLI (B3, B4, B5, B6), questi ultimi necessari per il calcolo di grandezze accessorie alla determinazione di LST, in particolare degli indici NDVI, dell'emissività superficiale e della trasmittanza atmosferica. Il metodo utilizzato è quello descritto da Rozenstein et al., (2014).

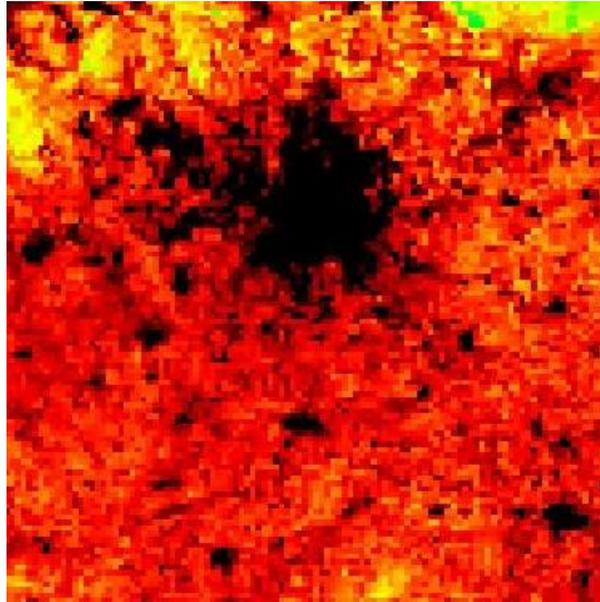


Figura D.2.2. Esempio di immagine di LST sull'area di studio

L'interpolazione tramite Co-Kriging di tali dati di temperatura dell'aria e LST ha permesso di ottenere mappe di temperatura dell'aria ad alta risoluzione (100 m), accompagnate dalle relative incertezze di misura (Fig. D.2.3.). I valori di incertezza si riferiscono alle sole deviazioni standard di interpolazione, cui risulta difficile comporre le incertezze relative alle misure delle stazioni meteo e soprattutto a quelle satellitari non note.

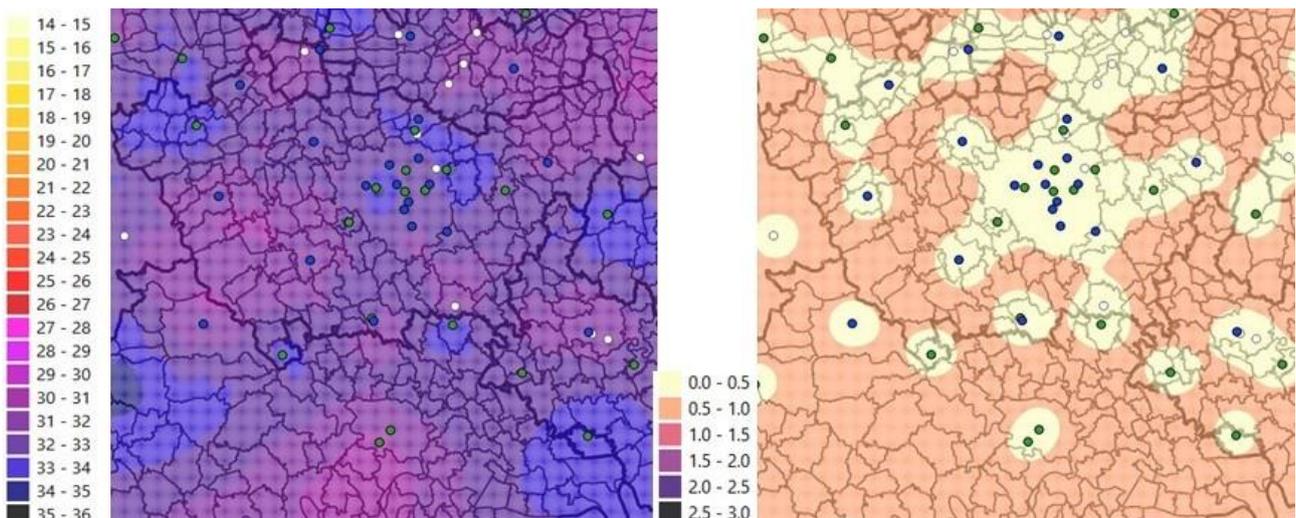


Figura D.2.3. Mappa della temperatura dell'aria (°C) e corrispondente mappa delle incertezze (°C)
(a sinistra: temperatura dell'aria; a destra: deviazione standard)

Situazioni Tipo Climatiche (STC)

L'**isola di calore**, che si viene a formare in determinate situazioni in area urbana, non assume sempre le medesime caratteristiche e distribuzioni spaziali: a seconda dell'ora della giornata, della stagione e della situazione meteorologica in atto può risultare più o meno intensa e centrata su differenti zone della città.

Per dare una rappresentazione il più realistica possibile delle distribuzioni di temperatura dell'aria sul bacino aerologico di interesse, sono state individuate differenti situazioni climatiche, a cui a loro volta corrispondono diverse condizioni di isola di calore nei centri urbani.

Le **Situazioni Tipo Climatiche** (da qui in poi **STC**) sono state definite a partire dai dati medi orari delle 8 stazioni di Milano della rete FOMD, per il periodo dal 01/07/2015 (primo mese completo della stazione di Milano Sarpi, installata nel giugno del 2015) al 31/08/2019. Si hanno così a disposizione 36552 ore in tutto, di cui 8664 nei trimestri invernali e 10320 in quelli estivi.

Per ogni ora e per ognuna delle 8 stazioni è stata calcolato l'**Indice UHI** **Indice di intensità dell'Isola di Calore**⁵¹ (si veda par. 3.2), definito come la differenza tra il valore di temperatura media oraria misurata da una stazione urbana (T_u) e il valor medio di 5 stazioni rurali prese a riferimento (T_r):

$$I_{UHI} = T_u - T_r$$

Le stazioni rurali sono state scelte proprio per la loro peculiarità di essere installate in ambiente extra-urbano e localizzate in maniera tale da risultare rappresentative di differenti posizioni cardinali. Per ogni ora è stato quindi possibile individuare quale delle 8 stazioni di Milano presentasse l' I_{UHI} massimo, cioè la posizione dell'isola di calore milanese in relazione alle diverse direttrici cardinali.

Per individuare le **STC** si è proceduto applicando una serie di criteri, definiti con lo scopo di individuare **situazioni meteorologiche caratterizzate da tempo stabile, scarsa ventilazione e indice I_{UHI} elevato**: condizioni tipiche di contesti meteo con intensa isola di calore. Si sono quindi selezionati tutti gli episodi in cui:

- il Tipo di Tempo della giornata corrispondente fosse classificabile come situazione di alta pressione e tempo stabile (Borghi S., Giuliacci M., 1979);
- la ventilazione fosse di debole intensità mediamente su tutta la città, considerando il vento ottenuto dalla media delle otto stazioni di Milano inferiore a 1.3 m/s;

⁵¹ Frustaci et al, Climatology of the Milano Canopy Urban Heat Island by means of an operational urban meteorological network, 2° Congresso Nazionale AISAM
https://www.fondazioneomd.it/files/ugd/f20bef_1941d3796f9c49429bcef2fde7f42c0f.pdf

- l' I_{UHI} massimo delle 8 stazioni fosse maggiore di 3 °C, ovvero isola di calore particolarmente accentuata almeno in una delle zone della città rappresentate dalle 8 stazioni (appositamente localizzate per il monitoraggio dell'isola di calore cittadina).

Tale selezione è stata effettuata distintamente per:

- trimestre estivo (giugno, luglio e agosto) e trimestre invernale (dicembre, gennaio, febbraio), le due stagioni meteorologiche più soggette al fenomeno dell'isola di calore;
- due ore mattutine (dalle 10 alle 12) e due ore serali (dalle 21 alle 23): tali orari, espressi in ora UTC+1, rappresentano quelli in cui più frequentemente i satelliti Sentinel-3 sorvolano e inquadrano l'area di progetto.

Tali orari non corrispondono a quelli in cui tipicamente si verificano le minime e le massime giornaliere di I_{UHI} ; tuttavia il loro studio è particolarmente interessante, specie per quanto riguarda la fascia oraria serale che, soprattutto in estate, corrisponde a uno dei momenti della giornata in cui la differenza tra temperatura urbana e temperatura extra-urbana si fa maggiore.

Per gli episodi rispondenti a tutte le condizioni sopracitate, si è andati a considerare in quale delle 8 stazioni, e quindi in quale zona della città, si fosse registrata la I_{UHI} massima; a questo scopo, le tre stazioni di Milano Bocconi, Milano Centro e Milano Sarpi sono state considerate appartenenti ad una unica zona, indicata come Milano Centro, vista la loro vicinanza ed essendo tutte e tre localizzate nell'area delimitata dalla circonvallazione esterna cittadina.

In tutto il periodo considerato non si sono verificati episodi mattutini estivi che abbiano rispettato le condizioni applicate: difatti il valore massimo di I_{UHI} raggiunto nella fascia oraria del mattino, in situazioni di tempo stabile e con scarsa ventilazione, è di solo 0.9°C. Questo sottolinea come **le ore estive della tarda mattinata non siano particolarmente soggette al fenomeno dell'isola di calore.**

Riepilogando, sono state individuate e utilizzate:

- n° 3 Situazioni Tipo Climatiche per UHI invernale ore 10:00-12:00 UTC+1
- n° 2 Situazioni Tipo Climatiche per UHI invernale ore 21:00-23:00 UTC+1
- n° 3 Situazioni Tipo Climatiche per UHI estiva ore 21:00-23:00 UTC+1

Per ciascuna delle suddette coppie stagione-orario, si sono calcolate le **frequenze di accadimento di ogni STC sulla base della numerosità degli episodi rilevati dalle stazioni meteorologiche** (non della disponibilità di mappe di LST disponibili per lo stesso periodo, molto inferiore).

Mappe stagionali di temperatura dell'aria in condizioni di UHI

Non è stato possibile considerare tutti gli episodi di UHI occorsi e rilevati dalle stazioni meteo come illustrato nel precedente paragrafo: numerose immagini satellitari corrispondenti a tali episodi sono

state scartate a causa della presenza di nuvolosità, nebbie o anomalie orbitali, che non hanno permesso di ricavare in maniera corretta l'LST. Di conseguenza il numero di episodi per i quali è stato possibile elaborare le rispettive mappe di LST, e conseguentemente di temperatura dell'aria tramite Co-Kriging, è risultato inferiore rispetto al numero totale degli accadimenti effettivamente verificatesi. Inoltre alcune STC sono risultate meno rappresentate, in termini di numerosità delle mappe elaborate, rispetto ad altre.

Per ovviare a tali inconvenienti **vanno elaborate, separatamente per ciascuna stagione e orario di interesse, le mappe di temperatura dell'aria medie ed estreme in corrispondenza di ciascuna STC** caratterizzante le coppie stagione-orario.

Per ciascuna coppia stagione-orario, **la MAPPA MEDIA STAGIONALE DI TEMPERATURA DELL'ARIA è stata calcolata come media delle relative mappe medie di STC pesata sulle frequenze di accadimento delle STC.**

Per ogni fascia oraria e stagione è stato identificato l'**estremo stagionale**, cioè la **mappa che rappresenta la situazione più fredda o più calda** (a seconda della stagione) tra tutte quelle analizzate, sulla base dei valori di media e mediana delle temperature delle celle del reticolo.

Si è proceduto in maniera analoga per le mappe delle incertezze.

Mappe delle Ondate di Calore

Il metodo di elaborazione è del tutto analogo a quello relativo all'isola di calore.

Le giornate classificabili come Ondata di Calore (OC) nel periodo considerato sono 85 (per la definizione si veda Appendice D.1): si sono avuti dunque a disposizione 170 episodi nella fascia serale e 170 episodi in quella del mattino, considerando i precedentemente citati orari del passaggio satellitare.

Anche gli episodi di ondata di calore, sulla base delle diverse distribuzioni spaziali di temperatura occorse in Milano, sono stati classificati in tre diverse tipologie OC:

- Temperature massime nella zona centrale di Milano o distribuite omogeneamente sull'area cittadina (**Centro**)
- Temperature massime sulla direttrice **Nord-Ovest**
- Temperature massime sulla direttrice **Nord-Est**

Tali configurazioni rispecchiano in generale la concomitante distribuzione spaziale della temperatura dell'aria sull'intero bacino territoriale: trattasi di fenomeno estremo meteorologico esteso dalla mesoscala alla scala sinottica.

Come nel caso delle STC non è stato possibile avere a disposizione mappe di LST per tutti gli episodi occorsi, a causa della presenza parziale di nuvolosità o anomalie orbitali che hanno compromesso le immagini satellitari. **Per ogni tipologia di OC**, la media delle mappe di temperatura dell'aria a disposizione ha restituito la **corrispondente mappa media di temperatura dell'aria**.

La MAPPA MEDIA RAPPRESENTATIVA DELL'ONDATA DI CALORE, sia per la mattina che per la sera, è stata ottenuta come **media pesata delle mappe medie per tipologia di OC sulle rispettive frequenze di accadimento**. Per ogni fascia oraria è stato identificato l'**estremo**, cioè la mappa che rappresenta la situazione più calda tra tutte quelle analizzate quale media e mediana dei valori di cella del reticolato.

Lo stesso procedimento è stato eseguito per le mappe delle incertezze.

D.3 Metodologie di calcolo degli indicatori contenuti nel Catalogo delle Precipitazioni

Per il calcolo degli indicatori contenuti nel Catalogo delle Precipitazioni sono state elaborate 35 stazioni provenienti da 3 diverse reti di misura: Fondazione Osservatorio Meteorologico Milano Duomo (FOMD), Metropolitana Milanese (MM) e Agenzia Regionale Protezione dell'Ambiente Lombardia (ARPA).

I dati utilizzati nelle elaborazioni fanno riferimento al periodo **Dicembre 2012 – Novembre 2020**, salvo dove diversamente specificato. In modo da rendere omogenee le analisi, tutti i **dati** provenienti dalle stazioni sono stati **aggregati temporalmente**, quando possibile, **al passo temporale di 10 minuti**. Fanno eccezione le sole stazioni di Trezzo sull'Adda, Busto Arsizio ACCAM e Saronno della rete ARPA poiché nel periodo considerato presentavano diversi campionamenti su tempi superiori ai 10 minuti; per tali stazioni è quindi disponibile un numero ridotto di indicatori.

Il dato grezzo utilizzato nelle elaborazioni, per tutte e tre le reti, **è il cumulato registrato dalle stazioni**. I dati di intensità sono stati ottenuti a partire dal cumulato sui 10 minuti, convertendolo a un cumulato su un'ora (mm/h). Questa scelta, nonostante per le stazioni FOMD si disponesse dei valori di intensità misurati, è stata compiuta per rendere il meno eterogeneo possibile l'insieme dei dati oggetto dell'analisi. Tuttavia, solo per le stazioni FOMD, è stato inserito un ulteriore indicatore, ricavato dai valori di intensità misurata.

Inoltre, sempre con lo scopo di rendere omogenee le analisi, **sono stati posti uguali a zero tutti i valori calcolati di intensità minori di 1,2 mm/h** (corrispondenti a un cumulato di 0,2 mm su 10

minuti). Questa scelta è stata guidata dalla sensibilità degli strumenti delle reti ARPA e MM (0,2 mm) minore della sensibilità della rete FOMD (0,01 mm).

Di seguito si presentano tutti gli indicatori inseriti nel Catalogo: per ciascuno è indicato il nome utilizzato nel Catalogo, la relativa unità di misura e i diversi periodi temporali di analisi sui quali sono stati calcolati.

INDICATORI ED ELABORAZIONI

Media delle precipitazioni cumulate

Nome indicatore nel Catalogo: Cumulato medio (mm)

Periodi temporali di analisi: mensile, stagionale, annuale

Questo indicatore è stato calcolato partendo dai valori di precipitazione cumulata giornaliera, a sua volta ricavata sommando i dati di precipitazione misurati con un passo temporale di 10 minuti.

Mediana delle precipitazioni cumulate

Nome indicatore nel Catalogo: Cumulato mediana (mm)

Periodi temporali di analisi: mensile, stagionale, annuale.

Questo indicatore è stato calcolato partendo dai valori di precipitazione cumulata giornaliera, a sua volta ricavata sommando i dati di precipitazione misurati con un passo temporale di 10 minuti.

Massimo delle precipitazioni cumulate giornaliere

Nome indicatore nel Catalogo: Massimo cumulato giornaliero (mm)

Periodi temporali di analisi: mensile, stagionale, annuale.

Questo indicatore è stato calcolato partendo dai valori di precipitazione cumulata giornaliera, a sua volta ricavata sommando i dati di precipitazione misurati con un passo temporale di 10 minuti. Per ogni periodo temporale di analisi è stato selezionato il valore massimo di cumulato su una giornata.

Media delle intensità delle precipitazioni

Nome indicatore nel Catalogo: Intensità media - evento di 10 minuti (mm/h)

Periodi temporali di analisi: mensile, stagionale, annuale.

Questo indicatore è stato calcolato partendo dai valori di intensità di precipitazione calcolati. Dal computo dell'indicatore sono esclusi tutti i valori uguali a 0, corrispondenti a situazioni in cui le precipitazioni sono assenti.

Massima intensità di precipitazione

Nome indicatore nel Catalogo: Intensità massima - evento di 10 minuti (mm/h)

Periodi temporali di analisi: mensile, stagionale, annuale.

Questo indicatore è stato calcolato selezionando per ogni periodo temporale di analisi il valore più elevato fra le intensità calcolate di precipitazione. Questo indicatore non è stato calcolato per le stazioni Trezzo sull'Adda, Busto Arsizio ACCAM e Saronno della rete ARPA.

Nome indicatore nel Catalogo: Intensità massima assoluta istantanea (mm/h)

Periodi temporali di analisi: mensile, stagionale, annuale.

Questo indicatore, **presente solo per le stazioni della rete FOMD**, è stato calcolato selezionando il massimo valore di intensità massima di precipitazione rilevato in un determinato periodo temporale

Numero medio dei giorni di pioggia

Nome indicatore nel Catalogo: Giorni di pioggia (n° medio)

Periodi temporali di analisi: mensile, stagionale, annuale.

Questo indicatore è stato ottenuto analizzando i giorni nei quali si è registrata una precipitazione di almeno 1 mm. Per ogni periodo temporale di analisi è stata calcolata la media sugli 8 anni considerati.

Numero massimo di giorni di pioggia consecutivi

Nome indicatore nel Catalogo: Massimo numero giorni di pioggia consecutivi (n°)

Periodi temporali di analisi: annuale.

Questo indicatore è stato ottenuto analizzando i giorni nei quali si è registrata una precipitazione di almeno 1 mm e selezionando il massimo numero di giorni consecutivi di precipitazione su tutto il periodo considerato (8 anni).

Numero medio di eventi con precipitazioni brevi ma intense

Nome indicatore nel Catalogo: Eventi con Precipitazioni ≥ 5 mm in 10 minuti (n° medio di accadimenti)

Periodi temporali di analisi: mensile, stagionale, annuale.

Questo indicatore è stato calcolato considerando gli eventi in cui si è verificato un cumulo di almeno 5 mm in 10 minuti. Per ogni periodo temporale di analisi è stata calcolata la media sugli 8 anni considerati.

Nome indicatore nel Catalogo: Eventi con Precipitazioni ≥ 15 mm in 30 minuti (n° medio di accadimenti)

Periodi temporali di analisi: mensile, stagionale, annuale.

Questo indicatore è stato calcolato considerando gli eventi in cui si è verificato un cumulo di almeno 15 mm in 30 minuti. Per ogni periodo temporale di analisi è stata calcolata la media sugli 8 anni considerati.

Nome indicatore nel Catalogo: Eventi con Precipitazioni ≥ 30 mm in 60 minuti (n° medio di accadimenti)

Periodi temporali di analisi: mensile, stagionale, annuale.

Questo indicatore è stato calcolato considerando gli eventi in cui si è verificato un cumulo di almeno 30 mm in 60 minuti. Per ogni periodo temporale di analisi è stata calcolata la media sugli 8 anni considerati.

Distribuzione cumulata delle durate di precipitazione

Nome indicatore nel Catalogo: Durate precipitazioni n-esimo percentile (min)

Periodi temporali di analisi: stagionale, annuale.

Questa distribuzione è stata calcolata partendo da tutti gli eventi, negli 8 anni considerati, con un valore di intensità di precipitazione calcolata sui 10 minuti. L'analisi si è svolta contando tutti gli eventi singoli e gli eventi consecutivi (almeno 2 consecutivi) durante i quali si ha una intensità calcolata maggiore o uguale a 1,2 mm/h. Poiché ogni evento corrisponde a un tempo di campionamento pari a 10 minuti, moltiplicando il numero di eventi consecutivi per 10 minuti si ottengono le durate dei fenomeni di precipitazione avvenuti durante gli 8 anni di riferimento.

In particolare sono stati calcolati i seguenti percentili: 25, 50, 75,95 e 99-esimo.

Distribuzione cumulata dei periodi senza precipitazioni

Nome indicatore nel Catalogo: Assenza precipitazioni n-esimo percentile (min)

Periodi temporali di analisi: stagionale, annuale.

Questo indicatore è stato calcolato partendo da tutti gli eventi, negli 8 anni considerati, con un valore di intensità di precipitazione calcolata sui 10 minuti. L'analisi si è svolta contando tutti gli eventi singoli e gli eventi consecutivi (almeno 2 consecutivi) durante i quali si ha una intensità calcolata minore a 1,2 mm/h. Poiché ogni evento corrisponde a un tempo di campionamento pari a 10 minuti, moltiplicando il numero di eventi consecutivi per 10 minuti si ottengono gli intervalli di tempo senza precipitazioni verificatisi durante gli 8 anni di riferimento.

In particolare sono stati calcolati i seguenti percentili: 25, 50, 75, 95 e 99-esimo.

Nota bene: la distribuzione cumulata dei periodi senza precipitazioni è stata calcolata **solo ed esclusivamente per le stazioni della rete FOMD.**

Distribuzione cumulata delle intensità di precipitazione

Nome indicatore nel Catalogo: Intensità precipitazioni n-esimo percentile (mm/h)

Periodi temporali di analisi: stagionale, annuale.

Questa distribuzione è stata calcolata partendo da tutti gli eventi, negli 8 anni considerati, con un valore di intensità di precipitazione calcolata sui 10 minuti maggiore o uguale a 1,2 mm/h. Dal computo della distribuzione sono esclusi tutti i valori minori di 1,2 mm/h, corrispondenti a situazioni in cui le precipitazioni sono assenti.

In particolare sono stati calcolati i seguenti percentili: 25, 50, 75, 95 e 99-esimo.

Variazione dei giorni di pioggia annui

Nome indicatore nel Catalogo: Variazione dei giorni di pioggia (giorni/anno)

Periodi temporali di analisi: annuale.

Questo indicatore è stato derivato dal numero dei giorni di pioggia annui, a partire dal 1900 fino al 2020 ed **esclusivamente per la stazione di Milano Centro**. La variazione è stata stimata tramite il test di Mann-Kendall unito allo stimatore di pendenza di Sen.

Variazione delle intensità di pioggia

Nome indicatore nel Catalogo: Variazione delle intensità (mm/h/anno)

Periodi temporali di analisi: annuale.

Questo indicatore è stato derivato dalle intensità di precipitazione medie, a partire dal 1900 fino al 2020 ed **esclusivamente per la stazione di Milano Centro**. La variazione è stata stimata tramite il test di Mann-Kendall unito allo stimatore di pendenza di Sen.

Variazione dei cumulati annui medi di pioggia

Nome indicatore nel Catalogo: Variazione dei cumulati (mm/anno)

Periodi temporali di analisi: annuale.

Questo indicatore è stato derivato dai cumulati annui totali, a partire dal 1900 fino al 2020 ed **esclusivamente per la stazione di Milano Centro**. La variazione è stata stimata tramite il test di Mann-Kendall unito allo stimatore di pendenza di Sen.

D.4 Linee segnalatrici di probabilità pluviometrica

Nell'ambito della caratterizzazione del regime pluviometrico è necessaria un'indicazione quantitativa della massima precipitazione di una determinata durata che si potrebbe verificare in un prefissato arco di tempo. Questa informazione è richiesta in sede progettuale per opere idrauliche ed altre applicazioni che presentino criticità in funzione dell'entità degli afflussi di pioggia e che in genere hanno una vita operativa prefissata. Detta indicazione può assumere due forme, una deterministica ed una probabilistica e può essere puntuale (su singole località) o spazializzata per aree omogenee.

In termini deterministici si fa direttamente riferimento alle precipitazioni misurate al di sopra di una certa soglia per ciascuna durata delle stesse, contando la frequenza degli accadimenti in periodi di diversa lunghezza. Questa informazione basilare può tuttavia essere fuorviante in fase di progetto nella misura in cui singoli eventi osservati di eccezionale intensità possono essere poco probabili per la durata prevista dell'opera, determinando una progettazione eccessivamente prudente e di conseguente costo inutilmente elevato. Al contrario, l'assenza casuale di eventi intensi su una certa località per periodi molto prolungati può determinare una progettazione insufficiente, che darà luogo ad eventi negativi e costosi. Su questi aspetti incide principalmente, per quanto attiene alla meteorologia, l'occasionalità delle precipitazioni e la loro forte variabilità sia spaziale che temporale e specialmente inter annuale sia in termini di quantità cumulata annua che di intensità e frequenza dei singoli eventi intensi.

Curve di probabilità pluviometrica

È pertanto più opportuno fare ricorso ad una **valutazione della probabilità di superamento di determinate soglie di precipitazione per durata dell'evento pluviometrico in archi temporali paragonabili alla durata di progetto**. Detta probabilità può essere calcolata dalle serie storiche registrate dalle stazioni pluviometriche estraendo i massimi osservati annualmente per singole durate di evento e valutandone la distribuzione di frequenza con l'uso della **funzione di distribuzione di probabilità di Gumbel** (Gumbel, 1958):

$$P(h) = e\left(-e^{-\alpha(h-u)}\right) \quad (1)$$

dove u e α sono i parametri caratteristici della distribuzione e P rappresenta la probabilità di non superamento di una certa altezza di precipitazione h . I parametri caratteristici della distribuzione di Gumbel sono legati alla media μ e alla deviazione standard σ dalle seguenti relazioni:

$$\begin{aligned}\alpha &= 1.28/\sigma \\ u &= \mu - 0.45\sigma\end{aligned}\quad (2)$$

In altre parole, nota la distribuzione delle altezze massime osservate se ne può calcolare la media μ e la deviazione standard σ , da cui si ottengono i parametri α , u e direttamente la probabilità di non superamento utilizzando la (1).

Definito un **Tempo di Ritorno T di un dato evento come il tempo medio intercorrente tra il verificarsi di due eventi successivi di entità uguale o superiore**, la probabilità che esso si verifichi è data da:

$$P = 1 - 1/T \quad (3)$$

Sostituendo nella (1) e risolvendo per h si ottiene, per ogni Durata di Evento t :

$$h(t, T) = u(t) - \ln(-\ln(P(T))) / \alpha(t) \quad (4)$$

che esprime l'altezza massima probabile per un evento di Durata t e un Tempo di Ritorno T .

I valori di $h(t, T)$ calcolati per una serie discreta di t e per un dato tempo di ritorno possono essere per comodità interpolati da una opportuna funzione, permettendo così il calcolo di $h(t, T)$ per qualsiasi valore delle variabili indipendenti (t, T) . Le curve interpolate prendono il nome di **Linee Segnatrici di Probabilità Pluviometrica (LSPP)** e corrispondono alle curve DDF (Depth-Duration-Frequency) della letteratura anglosassone sull'argomento. Allo scopo possono essere utilmente impiegate diverse funzioni, tra cui le più diffuse sono quella cosiddetta curva monomia con i parametri A e N :

$$y(t) = At^N \quad (5)$$

e quella a 3 parametri a , b , c nella forma esponenziale:

$$y(t) = a / (t + b)^c \quad (6)$$

In ambedue i casi i **parametri (A, N) e (a, b, c) vanno determinati con un "best fit"** sui dati $h(t, T)$ prodotti dalla distribuzione di Gumbel.

Per il Catalogo delle Precipitazioni è stata usata l'interpolazione a 3 parametri, che risulta essere sempre più performante della monomia; i parametri sono stati calcolati con il metodo di Levenberg-

Marquardt (Marquardt, 1963; Woydr, 2010), basato sul metodo dei minimi quadrati e adattato per problemi non lineari. Assumendo come valori iniziali:

$$a=10.0 \quad b=-0.5 \quad c=-0.5 \quad (7)$$

il metodo converge sempre in poche iterazioni fornendo i valori dei 3 parametri per la miglior interpolazione, assieme alla loro deviazione standard.

È inoltre possibile ottenere una valutazione dell'incertezza associata al valore di $h(z, T)$. Poiché dei 3 parametri a , b , e c quello determinante per la forma della curva interpolante e di maggior valore assoluto è il primo, per semplicità si può considerare la deviazione standard di questo solo parametro come misura dell'incertezza. La Figura D.4.1 mostra le LSPP relative alla stazione di Milano Centro di Fondazione OMD per 4 diversi tempi di ritorno (2, 5, 10 e 20 anni) con le relative bande d'incertezza a $\pm 1\sigma$ e a $\pm 2\sigma$. L'incertezza cresce con il tempo di ritorno, ma rimane relativamente contenuta. Tuttavia rimane ancora una significativa sottostima per le durate di qualche ora ed una sovrastima per le durate maggiori (fino a 24 ore) rispetto alla distribuzione dei massimi fornita dalla funzione di Gumbel.

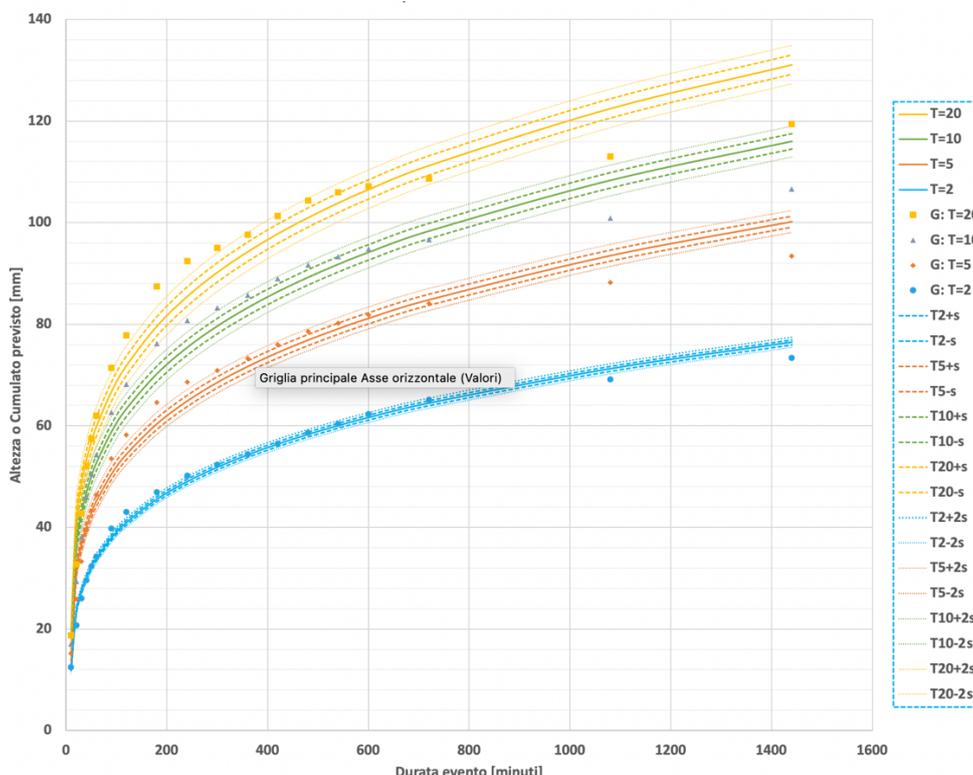


Fig. D.4.1: Curve di Probabilità Pluviometrica LSPP e bande di incertezze per la stazione Milano Centro di Fondazione OMD (1998-2020) per eventi di durata fino a 24 ore e tempi di ritorno di 2, 5, 10 e 20 anni.

G massimi forniti dalla distribuzione di Gumbel

Linee continue: LSPP per i diversi tempi di ritorno T

Linee tratteggiate: incertezza statistica d'interpolazione a $\pm 1\sigma$ ($s=\sigma$: deviazione standard dell'interpolazione)

Linee punteggiate: incertezza statistica d'interpolazione a $\pm 2\sigma$ ($s=\sigma$: deviazione standard dell'interpolazione)

Le bande d'incertezza a $\pm 1\sigma$ e $\pm 2\sigma$ delle LSPP sono calcolate sulla base del parametro A dell'interpolazione

Allo scopo di filtrare gli effetti di eventi del tutto eccezionali specialmente sulle serie corte è anche possibile applicare la distribuzione di Gumbel non ai massimi assoluti ma al 95° (o altro valore) percentile della distribuzione. Si deve tuttavia evidenziare che allungando la serie, la curva dei massimi e di conseguenza quella di probabilità tende a crescere specialmente per le durate brevi.

Al posto della funzione di Gumbel e delle altre funzioni interpolanti descritte, è possibile usarne altre: si rimanda al riguardo alla vasta letteratura sulla teoria di analisi dei valori estremi (EV) applicata all'idrologia o a recenti applicazioni in ambito nazionale (ad esempio: Gioia et al., 2021) e anche alle metodologie di spazializzazione delle precipitazioni (Frei & Isotta, 2019; Brunetti, 2006), sia pure in genere a impiegate a scale maggiori.

Nell'ambito del Progetto ClimaMi si è tuttavia ritenuto di attenersi alla procedura descritta sopra sia per la sua semplicità sia per il fatto di essere quella più diffusamente utilizzata in sede di progettazione di opere idrauliche (Becciu et al. 2016).

La metodologia è stata specializzata per le brevi durate, a partire dai 10 minuti, come richiesto da vari stakeholder del settore.

L'aspetto più critico nel calcolo delle LSPP, qualsiasi sia la formulazione adottata, risiede nella **lunghezza della serie di dati pluviometrici** considerando la forte variabilità spaziale e temporale della precipitazione: **la stima della probabilità sarà tanto migliore quanto più lunga la serie.**

Di ogni stazione meteorologica disponibile si è quindi utilizzata l'intera serie di misure disponibili.

Tra le stazioni disponibili con dati di precipitazione mediata sui 10 minuti, si è potuto lavorare solo due serie lunghe:

- Milano Centro (rete Fondazione OMD), dal 1998 al 2020 per un totale di 23 anni, con 0.25% dei dati nominali mancanti;
- Milano Monviso (rete MM), dal 1971 al 2020 ovvero 50 anni, con il 4.7% stimato dei dati nominali mancanti.

Queste stazioni vanno pertanto considerate come le più valide per la costruzione delle LSPP, che risulteranno meglio interpolate. Le rimanenti stazioni hanno durate significativamente inferiori e le relative LSPP possono essere sensibilmente influenzate da singoli eventi localizzati:

- 8 o 9 anni per la rete Fondazione OMD
- 16 anni per la rete MM (salvo Milano Monlué con 9 anni; Garbagnate con 11; Ronchettino con 12 anni),
- da 8 a 18 anni a seconda della stazione per la rete ARPA Lombardia.

Si è operata una valutazione delle **LSPP di ClimaMi** rispetto alle **LSPP di ARPA Lombardia**⁵², anche se i due approcci non sono facilmente confrontabili essendo **diversi i dati di input utilizzati**:

- ClimaMi utilizza i dati pluviometrici delle stazioni meteo con risoluzione a 10 minuti e le LSPP si riferiscono a tali localizzazioni;
- ARPA, per ottenere LSPP fruibili in tutto il territorio regionale, utilizza dati pluviometrici derivanti da un'interpolazione dei dati di stazione con quelli dei radar meteorologici⁵³.

In Fig. D.4.2 si riporta uno dei casi di accordo tra le LSPP ClimaMi e quelle ARPA, con differenze dello stesso ordine dell'incertezza stimata con la (7). L'approccio di ARPA si riflette in una variazione lenta e progressiva delle LSPP tra località vicine, mentre quello del progetto ClimaMi sembra cogliere maggiormente la discretizzazione territoriale che caratterizza il regime delle precipitazioni (Figg. D.2.3 e D.2.4). Questa considerazione si applica soprattutto al semestre caldo, in cui le precipitazioni hanno carattere temporalesco ovvero tendono ad essere brevi, intense e localizzate.

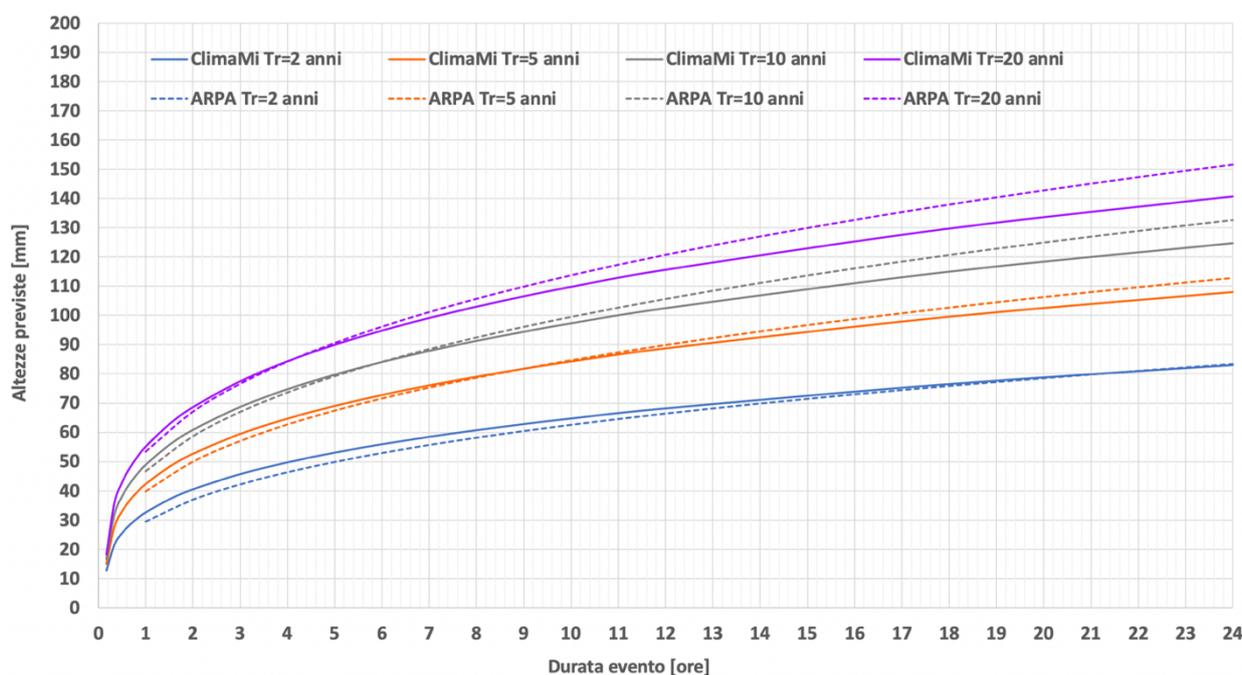


Fig. D.4.2: Confronto tra LSPP ClimaMi e LSPP ARPA Lombardia per la stazione Legnano di Fondazione OMD (parametri LSPP ARPA: $a_1=31.4$; $N=0.328$; $\alpha=0.2901$; $k=-0.0089$; $\epsilon=0.8295$)

⁵² <https://iris.arpalombardia.it/gis/NM/login.php>

⁵³ (ARPA Lombardia, 2015; De Michele et al., 2005)

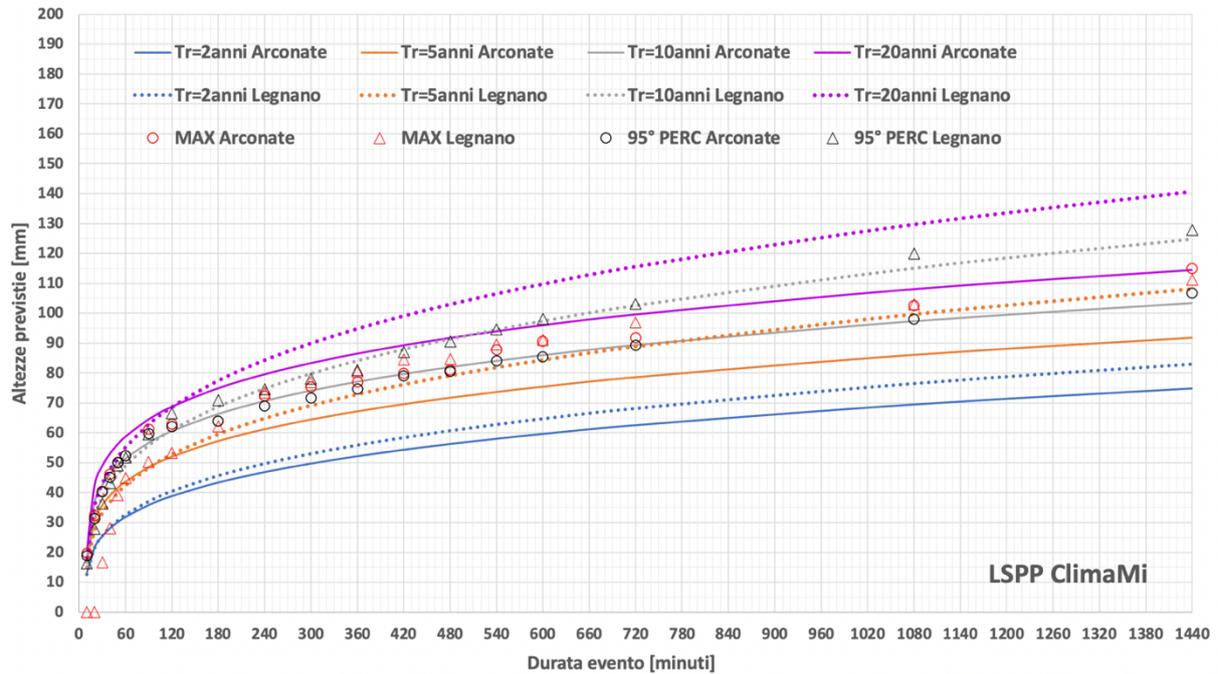


Fig. D.4.3: LSPP ClimaMi ed estremi osservati nelle stazioni Legnano (2013-2020) e Arconate (2010-2020)
Legnano (rete Fondazione OMD), Arconate (rete ARPA Lombardia)

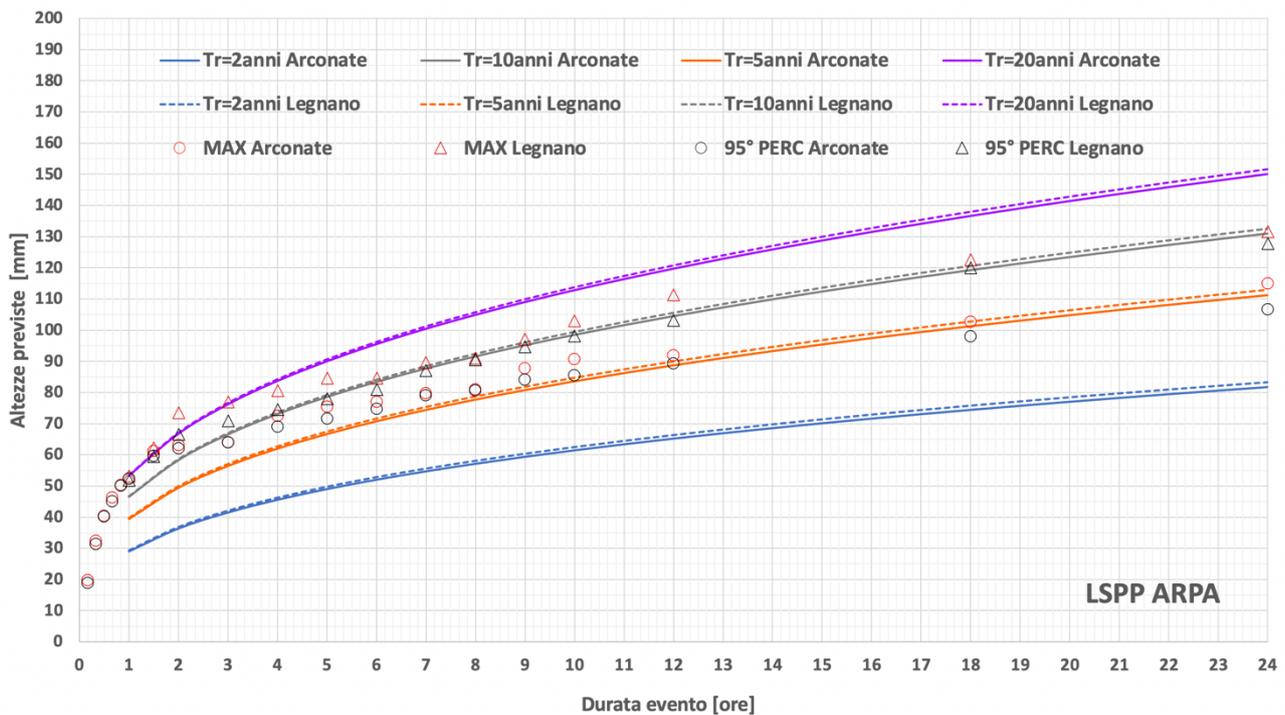


Fig. D.4.4: LSPP ARPA ed estremi osservati nelle stazioni Legnano (2013-2020) e Arconate (2010-2020)
Legnano (rete Fondazione OMD), Arconate (rete ARPA Lombardia)