



FONDAZIONE
Osservatorio Meteorologico
Milano Duomo



FONDAZIONE
ORDINE INGEGNERI
PROVINCIA DI MILANO

Con il contributo di



FONDAZIONE DELL'ORDINE DEGLI ARCHITETTI,
PIANIFICATORI, PAESAGGISTI E CONSERVATORI
DELLA PROVINCIA DI MILANO



Fondazione
Lombardia
per l'Ambiente

Fondazione
CARIPLO



PROGETTO CLIMAMIL

CLIMATOLOGIA
PER LE ATTIVITÀ PROFESSIONALI
E L'ADATTAMENTO AI CAMBIAMENTI CLIMATICI
NEL MILANESE

LINEE GUIDA

Guida all'utilizzo del SI-CU (Strumento Informativo Clima Urbano):
il Database Climatologico, l'Atlante delle Temperature e
il Catalogo delle Precipitazioni

Versione 3.0
febbraio 2022

Progetto ClimaMi - Climatologia per le attività professionali e l'adattamento ai cambiamenti climatici urbani nel milanese

è promosso da:

Fondazione OMD - Osservatorio Meteorologico Milano Duomo

in collaborazione con:

Fondazione Lombardia per l'Ambiente (*FLA*)

Fondazione Ordine degli Ingegneri della provincia di Milano (*FOIM*) e

Fondazione Ordine degli Architetti P.P.C della provincia di Milano (*FOAM*)

con il contributo di:

Fondazione Cariplo

Per informazioni www.progettoclimami.it

Sommario

Introduzione.....	4
1. LA CRISI CLIMATICA E L'AMBIENTE URBANO.....	8
1.1 <i>Le città e il clima: introduzione</i>	9
1.2 <i>Alcuni fondamenti della questione climatica.....</i>	11
1.2.1 <i>Due definizioni per affrontare il cambiamento.....</i>	11
1.2.2 <i>Segnali, tendenze, effetti</i>	12
1.2.3 <i>Tre approcci all'adattamento.....</i>	13
1.2.4 <i>Non solo cosa, ma dove e per chi: una questione di equità sociale</i>	15
2. L'ADATTAMENTO ALLA CRISI CLIMATICA IN AMBIENTE URBANO.....	18
2.1 <i>Adattare la progettazione, progettare per l'adattamento.....</i>	19
2.2 <i>Strategie di adattamento climatico urbano e progettazione: quale legame?.....</i>	20
2.2.1 <i>Il modello impatti – obiettivi - azioni</i>	20
2.2.2 <i>Quali impatti?.....</i>	22
2.2.3 <i>Quali azioni?</i>	25
2.2.4 <i>Quali risultati ed effetti?.....</i>	29
2.2.5 <i>Strumenti e piattaforme europee, nazionali e locali per l'adattamento climatico e la resilienza in ambiente urbano.....</i>	30
2.3 <i>Gli ambiti di applicazione del progetto ClimaMi e gli impatti del cambiamento climatico</i>	32
2.4 <i>Considerazioni conclusive: l'uso di dati e indicatori quantitativi nell'ambito professionale per l'adattamento</i>	32
3. IL CLIMA E GLI INDICATORI NELL'AMBIENTE URBANO.....	37
3.1 <i>Clima e cambiamento climatico: definizioni e dati</i>	38
3.2 <i>Il clima urbano e l'isola di calore.....</i>	45
3.3 <i>Le precipitazioni in ambiente urbano.....</i>	51
4. USO DEGLI INDICATORI CLIMATICI	58
4.1 <i>Introduzione agli indicatori climatici.....</i>	59
4.2 <i>Ambiti di applicazione in ambiente urbano.....</i>	59
4.2.1 <i>Progettazione edificio-impianto</i>	59
4.2.2 <i>Energia e consumi energetici.....</i>	63
4.2.3 <i>Deflusso meteorico urbano</i>	71
4.2.4 <i>Pianificazione territoriale.....</i>	76
4.2.5 <i>Gestione Verde urbano.....</i>	78
4.2.6 <i>Il benessere termoigrometrico e la salute pubblica.....</i>	82
4.3 <i>Rappresentatività spazio-temporale degli indicatori climatici.....</i>	86
5. SI-CU – STRUMENTO INFORMATIVO CLIMA URBANO:.....	90

5.1. Lo Strumento Informativo Clima Urbano SI-CU.....	91
5.2. Il Database Climatologico.....	93
5.2.1 Gli indicatori climatici.....	94
5.2.2 Scala spaziale e temporale	94
5.2.3 Stazioni e Metadata	97
5.2.4 Le variabili fondamentali e le incertezze di misura.....	99
5.2.4.a Temperatura dell'aria	99
5.2.4.b Umidità relativa.....	101
5.2.4.c Pressione atmosferica.....	101
5.2.4.d Precipitazioni	101
5.2.4.e Vento.....	102
5.2.4.f Radiazione solare.....	102
5.2.4.g Fulmini.....	102
5.2.5 Indicatori derivati.....	103
5.2.6 Organizzazione logica del Database.....	103
5.3 L'Atlante Climatico Delle Temperature Dell'aria.....	104
5.3.1 Isola di Calore: le Situazione Tipo Climatiche (STC)	107
5.3.2 Ondate di Calore.....	114
5.3.3 Contenuti dell'Atlante.....	118
5.4 Il Catalogo delle Precipitazioni	120
5.4.1 Le stazioni di misura.....	121
5.4.2 Gli Indicatori pluviometrici.....	122
5.4.3 Le Linee Segnatrici di Probabilità Pluviometrica (LSPP).....	126
6. GESTIONE DEGLI INDICATORI	129
6.1 Caratteristiche qualitative degli indicatori ClimaMi.....	130
6.2 Problemi legati alla misura in aria ambiente.....	132
6.3 Errore, propagazione dell'errore, livelli di confidenza, incertezza e conseguenze.....	133
APPENDICE A - GLOSSARIO	138
APPENDICE B – TAVOLA SINOTTICA DEGLI INDICATORI CLIMAMI	143
B.1 Tavola sinottica degli indicatori del Database di ClimaMi.....	144
B.2 Stazioni e indicatori del Catalogo delle Precipitazioni.....	151
APPENDICE C – STRUMENTI E ATTORI EUROPEI ED EXTRAEUROPEI	154
C.1 Strumenti e piattaforme europee ed extra-europee per l'adattamento climatico e la resilienza in ambiente urbano	155
C.1.1 Climate-ADAPT e l'Urban Adaptation Support Tool	155
C.1.2 L'Urban Adaptation Map Viewer.....	157
C.1.3 La Tassonomia UCAIF per gli impatti nell'azione urbana e il clima	157
C.1.4 Le Climate Resiliency Design Guidelines della Città di New York.....	159
C.2 Quadro degli attori e delle iniziative attuali.....	161
APPENDICE D – NOTA METODOLOGICA	164
D.1 Metodologie di calcolo degli indicatori climatici del Database.....	165
D.2 Atlante Climatico della Temperatura dell'Aria.....	175

<i>D.3 Metodologie di calcolo degli indicatori contenuti nel Catalogo delle Precipitazioni.....</i>	<i>183</i>
<i>D.4 Linee segnalatrici di probabilità pluviometrica.....</i>	<i>188</i>
BIBLIOGRAFIA E RIFERIMENTI.....	194

Introduzione

L'atmosfera urbana è uno degli ambienti più complessi dal punto di vista meteo climatico: una "collezione di milioni di microclimi". Temperatura, ventilazioni e precipitazioni possono variare significativamente anche a distanza di pochi metri ed essere fortemente influenzate dalle caratteristiche geometriche, strutturali e funzionali del tessuto urbano.

In molte attività professionali di tipo progettuale, gestionale e pianificatorio in ambito urbano i dati climatici sono necessari, insieme a parametri e informazioni di altra natura, come input in algoritmi, dimensionamenti, modelli o come elementi di supporto delle decisioni.

Saper scegliere e valutare la bontà e la consistenza dei dati climatici a disposizione rispetto alla scala spazio-temporale del progetto, nonché stabilire la loro coerenza con tutti gli altri dati in ingresso progettuali, diviene essenziale ai fini di stabilire il livello di prestazione attesa e successivamente quantificarne la performance reale (consumi energetici, comfort indoor o in ambiente esterno, ecc.).

Le valutazioni di performance *ante e post operam* sono tanto più necessarie in un periodo di veloce alterazione del clima quale quello attuale e di impatti climatici già ora evidenti e misurabili nelle nostre stesse città: ondate di calore estive e precipitazioni brevi e intense.

Il Progetto ClimaMi "Climatologia per le attività professionali e l'adattamento ai cambiamenti climatici urbani nel milanese" è nato con l'intento di rafforzare la conoscenza e la consapevolezza delle dinamiche del clima in ambiente urbano e far sì che l'adattamento al cambiamento climatico locale sia considerato un fattore prioritario nelle attività professionali pubbliche e private quotidiane al pari delle analisi costo/benefici.

Il progetto mira a fornire, ad uso dei professionisti e relativamente al bacino aerologico milanese, uno **Strumento Informativo sul Clima Urbano (SI-CU)** che, alla fine di questi tre anni di attività, si compone di un **Database Climatologico** riferito all'ultimo decennio in corso, dell'**Atlante Climatico della Temperatura dell'Aria**, del **Catalogo delle Precipitazioni** e delle relative **Linee Guida**.

Il presente documento è da intendersi come Linee Guida rivolte ai professionisti e ai tecnici di diversi settori della progettazione e pianificazione in ambito urbano con l'intento di:

- introdurla al tema della crisi climatica in atto, fornendo conoscenze di base sulla questione e informazioni propedeutiche alla comprensione del quadro di istituzioni, attori, soggetti e strumenti che definiscono e regolano la materia a livello globale, europeo, nazionale e locale
- fornire una traccia di percorso logico per il professionista che si approccia all'uso di dati climatici nella progettazione, in particolare di soluzioni di adattamento alla crisi climatica

-
- presentare gli indicatori climatici prodotti nell'ambito del progetto ClimaMi, il relativo database e le sue caratteristiche e fornire utili indicazioni su come utilizzare e gestire gli indicatori stessi nella propria attività quotidiana.

Le appendici completano poi con tavole e approfondimenti i contenuti delle Linee Guida.

Queste Linee Guida si pongono dunque l'obiettivo di iniziare un ponte tra la complessità del tema della crisi climatica, che può essere a buona ragione considerato di livello contemporaneamente globale e locale nonché di interesse attualissimo, e la pragmatica della pratica quotidiana dei professionisti e tecnici operanti tanto nel settore pubblico quanto nel privato.



1. LA CRISI CLIMATICA E L'AMBIENTE URBANO

1.1 Le città e il clima: introduzione

In un discorso tenuto al C40¹ *World Mayors Summit*, svoltosi a Copenaghen nell'Ottobre 2019, il Segretario Generale delle Nazioni Unite António Guterres ha affermato che “le città saranno il luogo dove la battaglia per il clima sarà largamente vinta o persa”². Più del 70% delle emissioni globali di CO₂, infatti, sono prodotte dalle città: le scelte che verranno fatte sulle infrastrutture urbane nei prossimi decenni, sulle costruzioni, l’edilizia, l’efficienza energetica, la produzione energetica e il trasporto, avranno un’influenza fortissima sulla curva delle emissioni globali. Si aggiunga a questo, la previsione che indica come, entro il 2050, sette persone su dieci vivranno in un’area urbana, forse anche spinte, se la tendenza dovesse continuare, dal peggioramento delle condizioni ambientali generali e dalla speranza di trovare nelle città luoghi migliori per opportunità, coesione sociale e lavoro. Per questi motivi, il Segretario Generale ha parlato chiaramente della necessità di *climate-conscious urban planning*: **una pianificazione urbana che conosca e tenga in una considerazione primaria e fondamentale la questione climatica, in tutti i suoi complessi aspetti, da quelli più tecnici, a quelli sociali di inclusività ed equità sociale, perché un ambiente urbano sano e vivibile sia per tutti i cittadini e in tutta la città.**

Il raggiungimento degli obiettivi fissati dall’Accordo di Parigi, sia in termini di riduzione delle emissioni attraverso i NDC (*nationally determined contributions*, contributi determinati a livello nazionale), sia in termini di azione di adattamento, richiederà profonde trasformazioni nelle città, ma l’adattamento alla crisi climatica e la mitigazione sono evidentemente problematiche che si aggiungono a quelle già note di gestione e pianificazione urbana, specialmente nei grandi centri, quali la crescente pressione demografica, la necessità di ampliare e migliorare strutture e infrastrutture, mantenendo tuttavia l’impegno alla riduzione di consumo del suolo; inoltre devono essere ricordati anche fattori quali l’invecchiamento della popolazione, la disegualianza sociale in aumento, la carenza di abitazioni adeguate e economiche, la criticità della qualità dell’aria, ed altre ancora comuni a molte città nel mondo³.

Il mantenimento e il miglioramento delle condizioni di vita per i cittadini sono per altro aspetti cruciali anche per il raggiungimento dei *Sustainable Development Goals* (si veda il Box 1). Le azioni che le città decideranno di intraprendere rispetto ai temi citati dovranno implicare trasformazioni spesso anche profonde, e la loro urgenza, per iniziare traiettorie positive di cambiamento, si fa ogni giorno più forte.

¹ C40 è una rete volontaria delle maggiori metropoli del mondo, impegnate ad affrontare la crisi climatica (<https://www.c40.org/>)

² <https://unfccc.int/news/guterres-cities-are-where-the-climate-battle-will-largely-be-won-or-lost>

³ European Environmental Agency, 2018

Box 1. Sviluppo Sostenibile e Adattamento al Cambiamento Climatico

I Sustainable Development Goals

(SDGs) rappresentano lo strumento fondamentale per la definizione di obiettivi di sviluppo anche a livello locale. Gli SDG sono **obiettivi di sviluppo sostenibile** che le Nazioni Unite hanno concertato e proposto a partire dal 2015 e con l'orizzonte del 2030. Essi definiscono nuovi



obiettivi, in continuità con il lavoro fatto attraverso i *Millenium Development Goals* (2000-2015), coinvolgendo ora tutta la comunità internazionale (sia paesi poveri che paesi economicamente più sviluppati; sia Stati, che Amministrazioni locali, terzo settore, imprese private e cittadini) nel raggiungimento di questi obiettivi e ampliando le aree di intervento verso un più completo **sviluppo umano integrato**.

L'SDG 13, "*Take urgent actions to combat climate change and its impacts*" è dedicato proprio all'**azione per il clima** e la sua posizione è paritaria rispetto a qualsiasi altro obiettivo.

L'adattamento è quindi, nella visione globale, parte integrante del processo di sviluppo sostenibile e, nello stesso modo, nelle realtà locali l'adattamento deve avere **uguale dignità** e peso all'interno delle agende politiche per lo sviluppo, rispetto agli altri obiettivi e strategie.

Nell'ambito degli SDG, l'**obiettivo 13** incrocia e si integra con l'**obiettivo 11, Città e comunità sostenibili**: nell'ambito degli SDG, l'adattamento al cambiamento climatico non è circoscrivibile a un singolo obiettivo. Questo tema rappresenta un elemento trasversale di molti dei 17 obiettivi, dal momento che i cambiamenti climatici costituiscono una potenziale minaccia per diversi ambiti, tra cui la sicurezza alimentare, la salute umana, la sostenibilità e inclusività degli insediamenti urbani.

Inoltre, i temi di mitigazione e adattamento si intersecano naturalmente con ancora maggior forza nell'ambito urbano: i progettisti sono chiamati a sviluppare soluzioni a zero o basse emissioni, in accordo con gli obiettivi di riduzione delle emissioni concordati a livello nazionale e locale (sulla base dell'Accordi di Parigi e successivi negoziati), ma per essere efficaci gli sforzi di riduzione delle emissioni devono tenere conto delle nuove condizioni climatiche e della necessità di adattamento ad esse nello stesso tempo.

Sviluppo compatibile con il clima



Adattato da Mitchell e Maxwell, 2010

Figura 1.1 Diagramma di Venn delle Strategie di Sviluppo sostenibile, Adattamento e Mitigazione del Cambiamento Climatico

1.2 Alcuni fondamenti della questione climatica

1.2.1 Due definizioni per affrontare il cambiamento

Il riscaldamento globale, il cambiamento climatico o, nella sua denominazione più attuale, **la crisi climatica è un fenomeno che interessa tutto il globo, con ricadute locali, anche molto diverse in differenti parti del mondo, ma sostanzialmente ovunque.**

La questione climatica è probabilmente il tema, a questa scala, più critico e urgente del nostro tempo, con potenziali impatti in praticamente ogni settore dell'attività umana, direttamente o indirettamente, oltre che sugli ecosistemi e la biodiversità.

Due sono le vie con cui la crisi climatica è affrontata, entrambe fondamentali, complementari, assolutamente non esclusive, ma anzi possibilmente e potenzialmente sinergiche:

Mitigazione (del cambiamento climatico)

Qualsiasi intervento umano che riduca le fonti (sources) di rilascio, o rafforzi e potenzi le fonti di assorbimento (sinks) dei gas serra.

Adattamento (al cambiamento climatico)

Il processo di adattamento al clima attuale o atteso e ai suoi effetti. Nei sistemi umani, l'adattamento cerca di limitare i danni e di sfruttare le opportunità favorevoli. Nei sistemi naturali, l'intervento umano può agevolare l'adattamento al clima atteso e ai suoi effetti.

1.2.2 Segnali, tendenze, effetti

Nel 2016, le nazioni aderenti della Convenzione Quadro delle Nazioni Unite sul Cambiamento Climatico, hanno ratificato un accordo globale, il noto Accordo di Parigi, impegnandosi per mantenere l'innalzamento della temperatura media globale "ben al di sotto dei 2 °C" rispetto ai livelli preindustriali e per proseguire gli sforzi per limitare l'aumento della temperatura a 1,5 °C. L'Accordo di Parigi impegna inoltre ad aumentare la resilienza dei paesi agli impatti dell'emergenza climatica, primo accordo formale di questo livello a riconoscere la necessità di uno sforzo per l'adattamento.

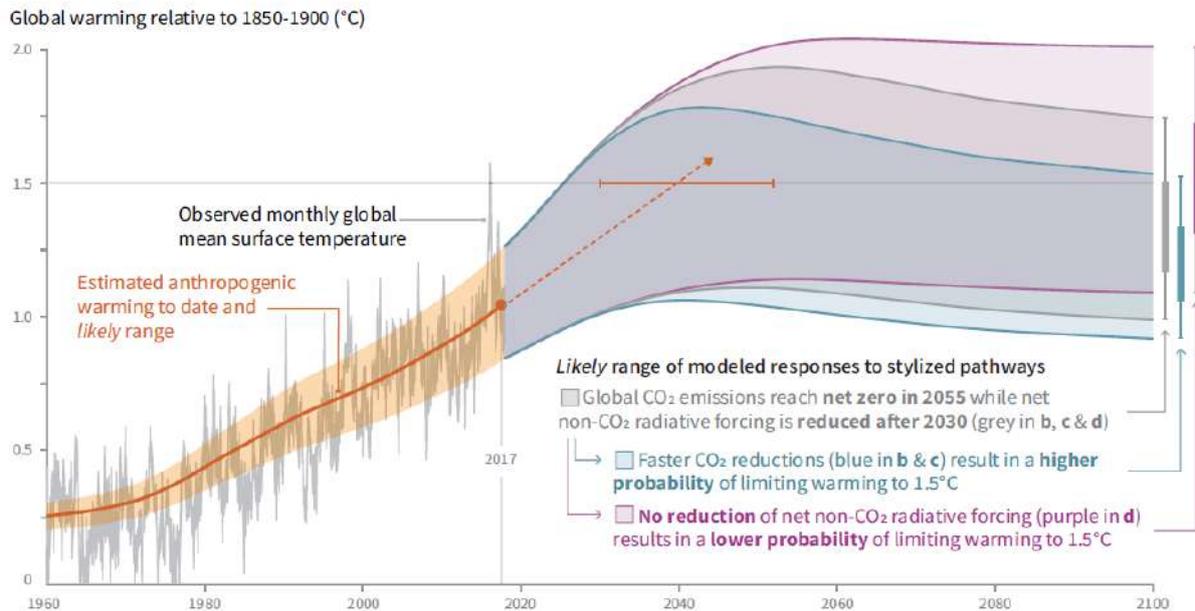


Figura 1.2 Traiettorie previste dell'aumento di temperatura globale media, in tre differenti scenari di riduzione netta delle emissioni di CO₂ in atmosfera (fonte IPCC 1.5 Special Report, 2018)

Un quadro valido a livello europeo per capire quali sono e potrebbero essere le conseguenze di tale tendenza è riportato nel rapporto "A Clean Planet for all - A European strategic long-term vision for a prosperous, modern, competitive and climate neutral economy" (Brussels, 28.11.2018 COM(2018) 773 final)), presentato in Figura 1.3.

Regione mediterranea

Grande aumento dei picchi di calore
Calo delle precipitazioni e della portata dei fiumi
Rischio crescente di siccità
Rischio crescente di perdita di biodiversità
Rischio crescente di incendi boschivi
Aumento della concorrenza tra vari utilizzatori di risorse idriche
Domanda idrica in aumento per l'agricoltura
Calo dei raccolti
Rischi crescenti per la produzione zootecnica
Aumento della mortalità da ondate di calore
Aumento degli habitat per vettori di malattie tropicali
Calo del potenziale di produzione di energia
Aumento della domanda d'energia per il raffrescamento
Calo del turismo estivo e aumento potenziale in altre stagioni
Aumento di pericoli climatici plurimi
Effetti negativi per la maggior parte dei settori economici
Alta vulnerabilità agli effetti di ricaduta dei cambiamenti climatici extraeuropei

Regioni montuose

Aumento della temperatura superiore alla media europea
Ritiro dei ghiacciai
Spostamento verso l'alto del popolamento vegetale e animale
Rischio maggiore d'estinzione delle specie
Rischio crescente di infestazioni forestali
Rischio crescente di frane e caduta massi
Cambiamenti del potenziale di energia idroelettrica
Calo del turismo sciistico



Figura 1.3 Impatti del cambiamento climatico per le regioni europee d'interesse per l'Italia (adattato da fonte: "A Clean Planet for all - A European strategic long-term vision for a prosperous, modern, competitive and climate neutral economy")

1.2.3 Tre approcci all'adattamento

I meccanismi dell'adattamento vengono ad oggi rappresentati sotto il punto di vista di **tre diversi approcci**. Il primo è un approccio di resistenza e reazione agli impatti dannosi e agli eventi di calamità (in inglese, chiamato *coping*). Questo approccio appare essere ad oggi sfortunatamente ancora largamente adottato nell'affrontare i pericoli naturali e i disastri. Un secondo approccio è quello cosiddetto incrementale (*incremental*) e prevede, in termini semplici, di aumentare gli interventi di difesa passiva contro gli impatti e le catastrofi, all'aumentare del pericolo e del rischio. Esso assomiglia di fatto ad un approccio di reazione, modulato e ripetuto nel tempo. Infine, vi è un approccio trasformativo (*transformative*): come suggerisce il termine, esso prevede trasformazioni

anche concettuali su come pianificare e progettare sia gli interventi di gestione del rischio, sia in senso integrativo, strutture e infrastrutture che caratterizzano l'ambiente antropizzato.

Lo schema di Figura 1.4 rappresenta in maniera esemplificativa i tre approcci e traccia sinteticamente su un grafico il rapporto dei benefici nel tempo relativo agli stessi.

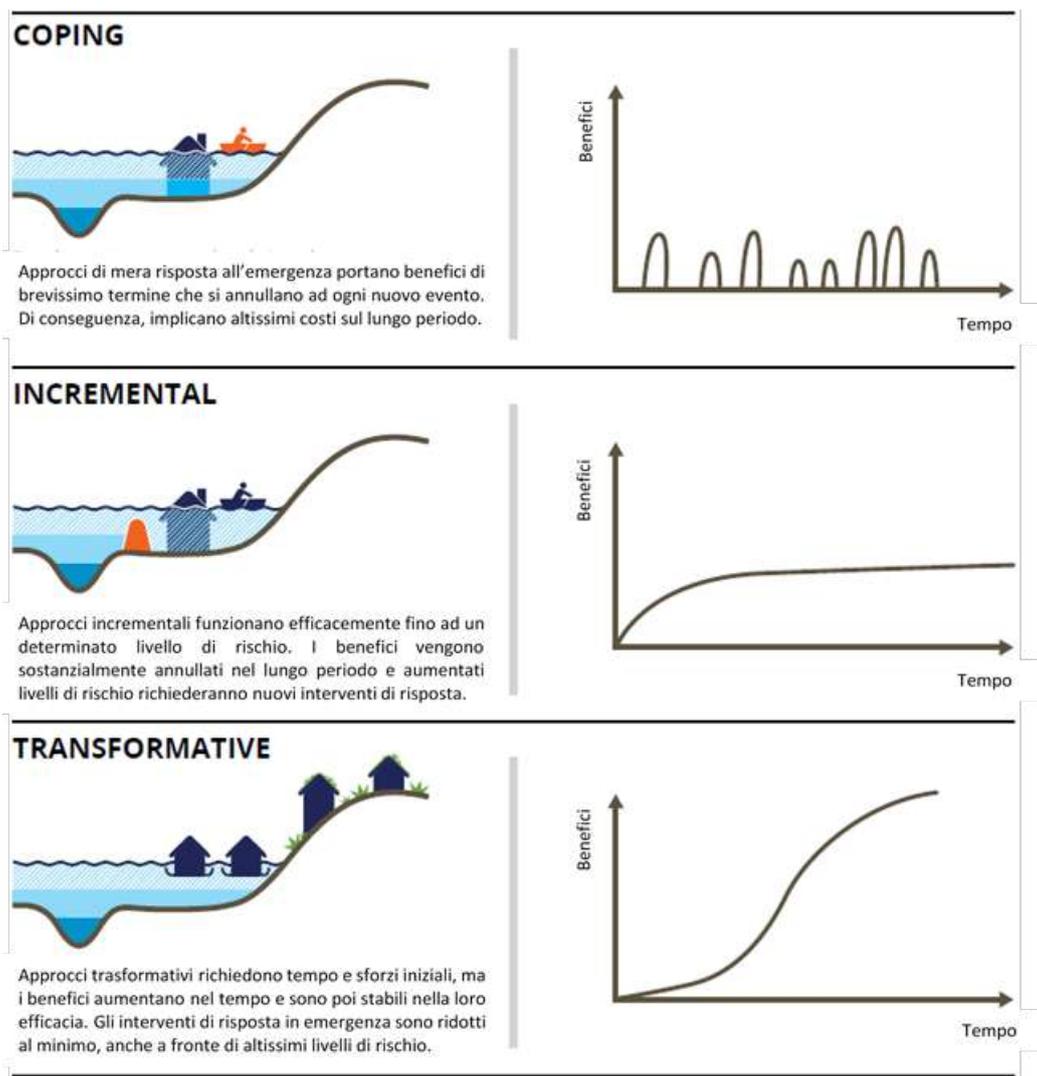


Figura 1.4 Esempi di differenti approcci all'adattamento e relativi benefici nel tempo: Reazione (Coping), Incrementale (Incremental), Trasformativo (Transformative) (nella figura, l'esemplificazione riguarda il rischio alluvionale – traduzione da fonte EEA Report No 12/2016 - Urban adaptation to climate change in Europe 2016 - Transforming cities in a changing climate)

1.2.4 Non solo cosa, ma dove e per chi: una questione di equità sociale

L'emergenza climatica è una **sfida sistemica**. Essa, infatti, interagisce fortemente con i **fattori socioeconomici** che regolano le nostre comunità e le tendenze nel tempo di questi, sia a livello locale, sia su scala più ampia.

Una grafica prodotta dall'Agencia Europea per l'Ambiente nell'ambito del report **"Unequal exposure and unequal impacts: social vulnerability to air pollution, noise and extreme temperatures in Europe"** (2018) (Figura 1.5) mostra un esempio di come la crisi climatica colpisca l'ambiente urbano e come vi sia una effettiva correlazione negativa tra qualità dell'ambiente urbano e gravità degli impatti stessi. La qualità urbanistica di un'area può determinare, aumentandolo, il rischio rispetto a pericoli quali le alluvioni, le ondate di calore, il peggioramento della qualità dell'aria. Tali aree spesso ospitano fasce già maggiormente vulnerabili a causa del disagio economico e sociale, lasciandole esposte in prima linea alla crisi climatica.

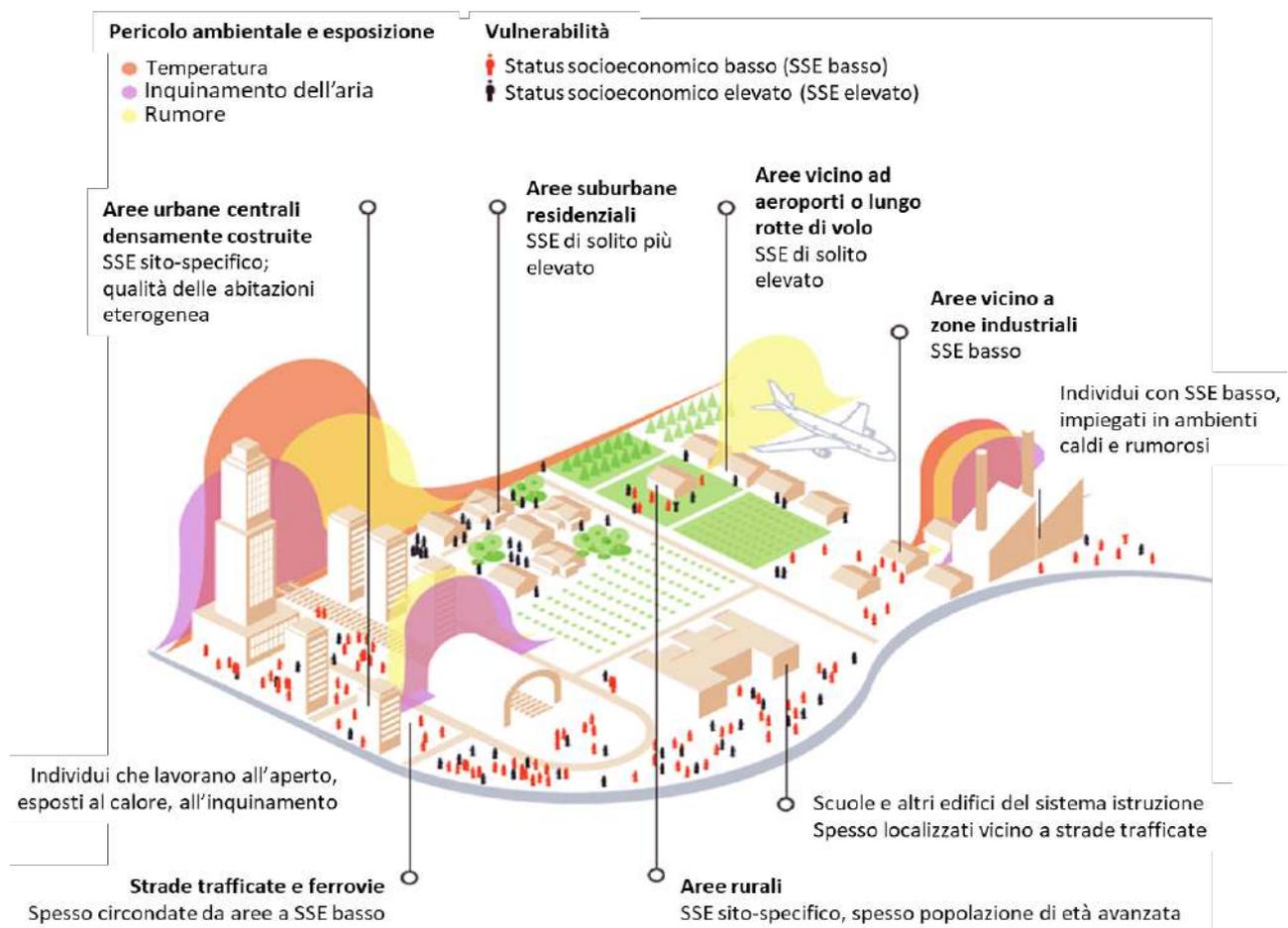


Figura 1.5 Rappresentazione schematica dei livelli di esposizione di diversi gruppi sociali all'inquinamento atmosferico, rumore, temperature estreme (fonte: traduzione da EEA Report No 22/2018 "Unequal exposure and unequal impacts: social vulnerability to air pollution, noise and extreme temperatures in Europe")

Il già citato report intitolato “Unequal exposure and unequal impacts: social vulnerability to air pollution, noise and extreme temperatures in Europe” (“Disparità di esposizione e impatti: vulnerabilità sociale all'inquinamento dell'aria, rumorosità e temperature estreme in Europa) affronta principalmente due fattori: l'effetto isola di calore e il criticizzarsi di alcune interazioni tra inquinamento atmosferico ed emergenza climatica, particolarmente delicati per l'ambiente urbano. Lo fa, inoltre, proprio nell'ottica dell'inclusività e dell'equità sociale, indicando come **le soluzioni della pianificazione urbanistica del prossimo futuro debbano tener conto del fatto che, all'acuirsi di alcune condizioni climatiche e ambientali, lo svantaggio per le fasce della popolazione più fragili potrebbe crescere ulteriormente.**

Città e comuni rappresentano, per altro, non solo la scala territoriale più piccola, ma anche un ambiente del tutto peculiare, quello urbano, definito da caratteristiche e problematiche legate all'emergenza climatica che richiedono approcci e soluzioni ad hoc.

Infatti, pur avendo l'emergenza climatica attributi e impatti diversi al variare delle condizioni locali, gli aspetti tipici dell'ambiente urbano accomunano città in ogni parte del mondo, facendo di tale ambiente un ambito specifico sia dell'indagine scientifica e tecnica per la ricerca di soluzioni appropriate e sia dell'elaborazione di politiche di gestione e sviluppo.



2. L'ADATTAMENTO ALLA CRISI CLIMATICA IN AMBIENTE URBANO

2.1 Adattare la progettazione, progettare per l'adattamento



In numerosi ambiti, le metodologie di progettazione di opere e strutture, così come la pianificazione urbanistica, utilizzano nei loro dimensionamenti basi di dati climatiche. Codici e standard che regolano la progettazione prevedono già l'utilizzo di dati meteo-climatici per dimensionamento. L'argomento all'origine del Progetto ClimaMi è tuttavia che le serie attualmente utilizzate potrebbero non rappresentare adeguatamente e accuratamente le condizioni attuali e certamente non la tendenza osservata per il futuro, sia in termini di temperature, sia di precipitazioni e tutti gli altri parametri climatici considerati. Per garantire accuratezza, efficacia ed efficienza delle progettazioni, le basi di dati utilizzate devono potersi ritenere adeguate: precise, al netto di un livello di errore e

incertezza accettabile e gestibile, e aggiornate.

La progettazione e la pianificazione costruite su basi climatiche corrette si possono definire "adattate" a nuove condizioni climatiche: questa è una condizione necessaria per poter contribuire realmente al processo di costruire l'adattamento all'emergenza climatica nell'ambito di una città. Non è ancora tuttavia condizione sufficiente.

I passi successivi richiederanno di integrare previsioni relative a scenari climatici per diversi orizzonti temporali futuri, in relazione evidentemente anche al ciclo di vita delle opere da progettarsi. Inoltre, progettazione e pianificazioni dovranno integrare principi, linee guida e approcci sviluppati in seno alle discipline dell'adattamento all'emergenza climatica.

Interventi di progettazione e pianificazione che rispondano a determinati criteri (primo fra tutti l'essere basati su dati climatici adeguati) possono contribuire ed essere "contabilizzati" nello sforzo complessivo di adattamento.

La loro contabilizzazione richiede tuttavia la predisposizione (da parte delle istituzioni cittadine) di una struttura che definisca impatti e relativi obiettivi di adattamento da raggiungere: una strategia o un piano di adattamento locali.

2.2 Strategie di adattamento climatico urbano e progettazione: quale legame?

2.2.1 Il modello impatti – obiettivi - azioni

In ambito urbano, l'azione complessiva di adattamento è regolata attraverso forme diverse di pianificazione che comprenda obiettivi di risposta all'emergenza climatica: strategie e piani (o piani di azione) di adattamento. Benché non esista uno standard per lo sviluppo di strategie o di piani di adattamento, tutti gli approcci si basano su un modello pressione-risposta-, dove il fattore di pressione viene dagli impatti climatici e la risposta viene formulata in termini di obiettivi e azioni, idealmente definiti in maniera quantitativa attraverso l'utilizzo di *target*.

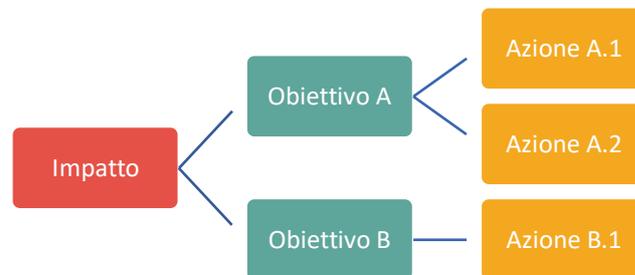


Figura 2.1 Diagramma Impatto - Obiettivo - Azione

Il framework concettuale fornito dall'IPCC (nel 5° Assessment Report del 2014) fornisce la chiave di lettura per gli elementi "impatto" e "rischio", come mostrato in Figura 2.2. L'impatto, o più precisamente la sorgente di pericolo, deriva dai segnali climatici (in genere identificabili in indicatori meteo-climatici) e dai loro impatti diretti sul sistema fisico. Essi contribuiscono, insieme ad altri fattori quali l'esposizione e la vulnerabilità a definire il rischio climatico.

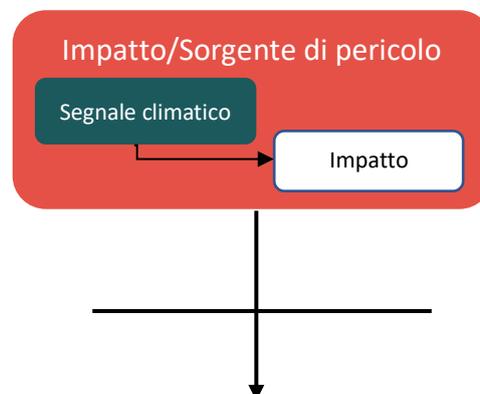


Figura 2.2 Definizione dei fattori del rischio (rielaborazione da IPCC AR5)

Un esempio di questo approccio particolarmente rilevante per l'ambiente urbano è quello dell'aumento delle temperature. Nella tabella sottostante, a titolo esemplificativo, rappresentiamo gli elementi impatto (segnale climatico) → rischio → possibile azione di adattamento.

SEGNALE CLIMATICO	RISCHIO	AZIONE
TEMPERATURE 	<ul style="list-style-type: none"> • Perdita di comfort • Rischi da calore • Aumento di consumi energetici per raffrescamento 	<ul style="list-style-type: none"> • Controllo dell'irraggiamento: ombreggiamento, orientamento, morfologia degli edifici

In Europa il Patto dei Sindaci (*the Covenant of Mayors Initiative on Climate Change Adaptation*, precedentemente *Mayors Adapt*), una iniziativa lanciata nel 2008 dalla Commissione Europea per attivare le città nello sviluppare e adottare azioni di adattamento, propone oggi il modello del PAESC: Piano d'Azione per l'Energia Sostenibile e il Clima. Il modello PAESC prevede nello specifico di definire con approccio quantitativo un insieme di goal (obiettivi specifici) che nel complesso definiscano la strategia di adattamento (es.: aumentare la *tree canopy cover* del 5% entro il 2030; ridurre l'uso di aria condizionata del 30% entro il...; ecc.) (Tabella 2.1).

Adattamento				
Obiettivo	Unità (% o altro)	Anno target	Anno base	Stato rispetto al target
Obiettivo A (es. <i>aumentare la tree canopy cover</i>)	5%	2030	2020	(es.) 1%
Obiettivo B (es. <i>ridurre l'uso di aria condizionata</i>)	30%	2050	2020	(es.) 7%

Tabella 2.1 Schema di definizione e quantificazione degli obiettivi secondo il modello PAESC – Patto dei Sindaci (fonte: Covenant of Mayors - Europe - SECAP template | Working document)

La costruzione di una pianificazione dell'adattamento urbano in questi termini consentirebbe quindi l'attivazione di un meccanismo di **responsabilizzazione e di contabilizzazione della progettazione e della pianificazione urbanistica**: a patto che esso risponda a requisiti opportuni, tra cui quello di essere basato su dati climatici adeguati, ciascun intervento, pubblico o privato, può essere conteggiato nei termini del suo contributo a specifici indicatori di adattamento, partecipando quindi al raggiungimento dei relativi obiettivi di adattamento.

2.2.2. Quali impatti?

La tabella nella pagina successiva (Tabella 2.2) rappresenta in maniera sintetica le sorgenti di pericolo definite dalla letteratura per l'ambiente urbano

Tabella 2.2 Come il clima influisce sull'abitare (ambiente urbano), il lavoro e i trasporti - Nota: gli esempi non sono esaustivi e potrebbero non essere rilevanti per tutte le città - (rielaborato a partire dalla fonte: Urban adaptation to climate change in Europe 2016 - Transforming cities in a changing climate - EEA Report No 12/2016)

SEGNALE CLIMATICO	RISCHIO	 ABITARE	 LAVORARE	 MUOVERSI	 AMBIENTE
TEMPERATURE 	CALORE 	<ul style="list-style-type: none"> Perdita di comfort Rischi da calore Aumento di consumi per raffrescamento, diminuzione per riscaldamento 	<ul style="list-style-type: none"> Diminuzione della produttività del lavoro Aumento di consumi per raffrescamento, diminuzione per riscaldamento 	<ul style="list-style-type: none"> Perdita di comfort sui trasporti pubblici Danni infrastrutture ferroviarie Aumento di consumi per raffrescamento, diminuzione per riscaldamento 	<ul style="list-style-type: none"> Effetti sui cicli biologici, biogeochimici Effetti sulla fenologia e le stagioni vegetative Effetti sull'ecologia e la biodiversità Effetti sulle condizioni di umidità e la struttura del suolo Effetti sulla qualità delle acque, per presenza inquinanti chimici o biologici o sedimento
Aumento delle temperature +	INCENDI 	<ul style="list-style-type: none"> Rischi per la salute e la sicurezza Danni alle abitazioni 	<ul style="list-style-type: none"> Danni ai beni economici 	<ul style="list-style-type: none"> Interruzioni vie di comunicazione 	
	SCARSITA' H2O 	<ul style="list-style-type: none"> Disagio Rischi per la salute e la sicurezza 	<ul style="list-style-type: none"> Produttività ridotta Interruzione energia e acqua corrente 	<ul style="list-style-type: none"> Limitazione ai trasporti via acqua corrente 	
Variazioni nel regime delle precipitazioni	RISCHIO IDROGEOLOGICO 	<ul style="list-style-type: none"> Rischi per la salute e la sicurezza Danni alle abitazioni 	<ul style="list-style-type: none"> Danni ai beni economici Problemi legati al sedimento e al trasporto solido 	<ul style="list-style-type: none"> Interruzioni vie di comunicazione 	
	RISCHIO IDRAULICO 	<ul style="list-style-type: none"> Disagi/rischi per la salute Danni alle abitazioni Interruzioni energia e acqua corrente 	<ul style="list-style-type: none"> Accessibilità ridotta Danni ai beni economici Interruzioni energia e acqua corrente 	<ul style="list-style-type: none"> Blocco di strade e ferrovie 	
PRECIPITAZIONI 	RISCHI METEO-CLIMATICI DIVERSI 	<ul style="list-style-type: none"> Disagi/rischi per la salute Danni alle abitazioni Interruzioni energia e acqua corrente 	<ul style="list-style-type: none"> Accessibilità ridotta Danni ai beni economici Interruzioni energia e acqua corrente 	<ul style="list-style-type: none"> Blocco di strade e ferrovie 	<ul style="list-style-type: none"> Incendi da fulminazione Abbattimenti da ventosità Effetti sull'ozono
EVENTI METEO-CLIMATICI ESTREMI 					
Variazioni nell'intensità e nella frequenza di fenomeni meteorologici potenzialmente pericolosi (ventosità, radiazione solare, fulminazioni, ecc.)					

Per l'Italia, il Piano Nazionale di Adattamento al Cambiamento Climatico identifica anch'esso una articolazione di impatti di riferimento, di cui lo schema seguente riporta quelli di principale interesse per l'ambito urbano.

Insediamenti urbani	
1.	Peggioramento della salute e del benessere insediativo della popolazione
2.	Riduzione dei momenti di socialità e peggioramento della qualità di vita
3.	Aumento dei danni alle infrastrutture e ai beni culturali e paesaggistici
4.	Aumento degli allagamenti con impatti negativi su infrastrutture, salute, attività economica e fornitura di servizi essenziali
5.	Variazione della biodiversità urbana e peggioramento delle condizioni per le aree verdi
6.	Aumento dei problemi di approvvigionamento idropotabile
7.	Problematiche per il rifornimento di energia
8.	Danni al sistema socioeconomico
9.	Aumento dei costi per le istituzioni pubbliche
Salute	
1.	Aumento dei rischi dovuti a frane, incendi ed eventi meteorologici estremi
2.	Aumento delle patologie legate alle alte temperature (asma e infarto miocardico acuto) e alla radiazione solare
3.	Aumento delle patologie allergiche respiratorie (asma)
4.	Aumento delle patologie trasmesse da vettori artropodi
5.	Aumento del rischio di esposizione a contaminanti chimici
6.	Compromissione della sicurezza alimentare
7.	Compromissione della disponibilità e qualità alimentare ed aumento dei costi
8.	Aumento dei costi di prestazioni ambientali e sanitarie
9.	Aumento dei costi in ambito lavorativo
10.	Aumento del rischio di tossinfezioni alimentari
11.	Aumento delle infezioni trasmesse con l'acqua
12.	Peggioramento delle prestazioni dei servizi idrici
13.	Cambiamento del comfort microclimatico negli ambienti interni
Trasporti e infrastrutture	
1.	Aumento dei danni da calore
1.1.	Espansioni termiche a strutture (ponti/viadotti)
1.2.	Surriscaldamento e deformazione e delle strutture ed infrastrutture di trasporto (asfalto, rotaie), in seguito alla presenza di ondate di calore
2.	Aumento dei danni da eventi meteorologici estremi o loro conseguenze
2.1.	Allagamento delle infrastrutture di trasporto terrestri;
2.2.	Aumento del rischio di scivolamento per pavimentazioni bagnate;
2.3.	Cedimento di argini e terrapieni ed erosione alla base dei ponti;
2.4.	Impatti indiretti legati alla stabilità dei versanti in seguito ad aumento delle precipitazioni, e relativa gestione delle acque di scorrimento;
2.5.	Valanghe e frane
2.6.	Allagamento di sistemi ipogei
3.	Riduzione dei danni da basse temperature
4.	Aumento dei disagi per il trasporto aereo
5.	Aumento dei disagi per la navigazione delle acque interne
6.	Erosione alla base dei ponti
Turismo	
1.	Modifica del valore paesaggistico del territorio
2.	Aumento dei rischi per la salute dei turisti
3.	Variazione della stagione turistica
4.	Cambio del tipo di attività svolte
5.	Variazione dell'attrattività e cambio delle destinazioni turistiche
6.	Modifica delle condizioni per il turismo lacustre
7.	Aumento dei costi dei servizi turistici e dei relativi prezzi
8.	Aumento delle situazioni di carenza idrica
9.	Aumento del turismo montano estivo

2.2.3 Quali azioni?

Tre importanti riferimenti di letteratura⁴ nell'ambito dell'adattamento all'emergenza climatica in campo urbano e attraverso la progettazione e pianificazione territoriale, suggeriscono una collezione di azioni per la risposta agli impatti definiti. La tabella sottostante presenta quindi le indicazioni delle linee guida "*Climate Resiliency Design Guidelines*" del New York City Mayor's Office of Recovery and Resiliency, del "*Climate change adaptation by design*", prodotte nel Regno Unito dall'organizzazione TCPA, in collaborazione con l'Agenzia Ambientale (riferimenti in bibliografia) e dell'Abaco delle Azioni di Adattamento, disponibile sulla piattaforma Territori Resilienti della Città Metropolitana di Milano.

⁴ NYC Mayor's Office of Recovery and Resiliency, *Climate Resiliency Design Guidelines - Version 3.0, 3/2019*; • Shaw R., Colley M., Connell, R. (2007) *Climate change adaptation by design: a guide for sustainable communities*. TCPA, London; https://www.cittametropolitana.mi.it/Territori_resilienti/adattamento/index.html

RISCHIO	Fonte	Soluzione
<p>CALORE</p> 	<p>NYC Climate Resiliency Design Guidelines - 3.0 (USA)</p>	<p>Riduzione dell'effetto isola di calore urbano</p> <ul style="list-style-type: none"> ● Aumentare la riflettanza solare delle superfici utilizzando pavimentazione di colore chiaro, rivestimenti e materiali, in combinazione con ombreggiatura, con un obiettivo minimo del 50% delle aree non strutturali dei siti di impianto. ● Aumentare l'ombreggiatura delle superfici piantando alberi o altra vegetazione, in combinazione con marciapiedi freschi, con un obiettivo minimo del 50% delle aree non strutturali dei siti di impianto. ● Rispettare gli standard di fenestrazione e isolamento per migliorare l'efficienza degli involucri degli edifici. ● Selezionare i tetti verdi/blu e/o altri elementi di paesaggio appropriati che massimizzano il raffreddamento con l'input degli architetti paesaggisti. <p>Minimizzazione dell'impatto dell'aumento del calore</p> <ul style="list-style-type: none"> ● Progettazione basata su dati climatici di lungo periodo e sulla vita utile dei componenti e dell'impianto. ● Sistemi di raffreddamento e altri sistemi HVAC per tutti gli edifici abitabili ● Valutazione degli impatti termici previsti sui sistemi e sui materiali: <ul style="list-style-type: none"> ○ Espansione termica, deformazione, rammollimento o altre forme di cambiamento o degradazione di materiale strutturale ○ Impatto sulla salute e la sicurezza degli occupanti esposti al calore; ○ Maggiore guasto o minore efficienza degli impianti elettrici o meccanici; ○ Prioritizzazione dei carichi critici per sistemi e componenti presso l'impianto; ○ Esigenze di controllo dell'umidità per edifici con uno standard più elevato per fenestrazione e isolamento.
	<p>Climate change adaptation by design - TCPA (UK)</p>	<p>Gestione delle alte temperature</p> <ul style="list-style-type: none"> ● Controllo dell'irraggiamento: ombreggiamento, orientamento, morfologia degli edifici ● Aumentare la ventilazione attraverso l'orientamento e la morfologia degli edifici ● Raffreddamento con acqua di falda o acqua di superficie ● Utilizzo di acque libere e di opere d'acqua ● Aumento del raffreddamento evaporativo ● Infrastrutture verdi ● Materiali da costruzione "freddi" o riflettenti su tetti o facciate ● Materiali "freddi" per pavimentazione ● Stoccaggio termico o massa termica ● Isolamento dell'involucro edilizio ● Raffreddamento attivo o meccanico
	<p>Territori Resilienti - Città Metropolitana di Milano</p>	<p>Superfici fredde</p> <ul style="list-style-type: none"> ● Superfici fredde a terra per il miglioramento della qualità urbana ● Superfici fredde a terra per il miglioramento della qualità urbana e la piacevolezza dei luoghi ● Superfici fredde a terra tramite ridipintura ● Superfici fredde a terra in parcheggi ● Superfici fredde a terra tramite sostituzioni di materiali con ridotto albedo <p>Pareti verdi</p> <ul style="list-style-type: none"> ● Facciata climatica <p>Microclima</p> <ul style="list-style-type: none"> ● Fontane per acqua potabile ● Vaporizzazione ● Fontane nel verde Fontane fruibili <p>Ombreggiatura</p> <ul style="list-style-type: none"> ● Ombreggiatura - Elementi rigidi fissi con pannelli fotovoltaici ● Ombreggiatura - Elementi rigidi fissi ● Ombreggiatura - Pergolati ● Ombreggiatura - Protezione degli edifici con elementi architettonici ● Ombreggiatura - Porticati ● Ombreggiatura tramite verde in quota ● Ombreggiatura - Elementi leggeri fissi

<p>SCARSITA' H2O</p> 	<p>Climate change adaptation by design - TCPA (UK)</p>	<p>Risorse idriche</p> <ul style="list-style-type: none"> ● Efficace gestione degli eventi di precipitazione estremi ● Impianti e raccordi ad alta efficienza idrica ● Bacini di pianura e di montagna ● Xeriscaping ● Controllo delle concessioni ● Gestione dell'inquinamento da fonti puntuali ● Uso alternativo di acque reflue provenienti da reti fognarie trattate ● Sistemi di drenaggio separati per acque superficiali e acque grigie/nere ● Raccolta e stoccaggio di acqua piovana ● SUDS <p>Gestione delle condizioni del suolo</p> <ul style="list-style-type: none"> ● SUDS ● Sistemi di controllo dell'umidità o reidratazione del suolo ● Gestione della vegetazione ● Controllo e manutenzione dei sistemi di drenaggio
<p>RISCHIO IDROGEOLOGICO</p> 	<p>Climate change adaptation by design - TCPA (UK)</p>	<p>Gestione delle condizioni del suolo</p> <ul style="list-style-type: none"> ● Sistemazione dei versanti ● Piantumazione per la difesa dall'erosione ● Gestione della vegetazione ● Fondazioni (edifici) più profonde e solide ● Strutture di controllo dell'erosione superficiale ● Controllo e manutenzione dei sistemi di drenaggio
<p>RISCHIO IDRAULICO</p> 	<p>NYC Climate Resiliency Design Guidelines - 3.0 (USA)</p>	<p>Variazioni nel regime delle precipitazioni</p> <ul style="list-style-type: none"> ● Adeguamento delle precipitazioni di progetto per il dimensionamento dei sistemi di smaltimento delle acque piovane ● Integrazione delle proiezioni sui cambiamenti climatici nella pianificazione del drenaggio

	Climate change adaptation by design - TPCA (UK)	<p>Gestione del rischio idraulico</p> <ul style="list-style-type: none"> • Deviazione dei flussi alluvionali dalle zone colpite e gestione dei percorsi alluvionali per far fronte a forti eventi piovosi • Mitigazione del rischio idraulico e laminazione delle piene, anche grazie all'uso di soluzioni verdi • Controllo alla fonte (servizio ecosistemico del territorio di montagna) • Tetti verdi • Valvole di non-ritorno • SUDS • Ampliamento delle fognature per aumentarne la capacità di smaltimento • Materiali resistenti alle inondazioni 	
	Territori Resilienti - Città Metropolitana di Milano	<p>SUDS: Canali e Scolì</p> <ul style="list-style-type: none"> • Bacini di infiltrazione e bioritenzione • Bacini di detenzione • Sistemi modulari geocellulari • Superfici permeabili • Trincee filtranti • Pozzi perdenti o d'infiltrazione <p>Forestazione delle aree urbane</p> <ul style="list-style-type: none"> • Boschi di pianura • Viali alberati • Interventi di riqualificazione col verde • Piantumazione in parcheggi • Verde a mitigazione di opere • Forestazione delle aree urbane <p>Pareti verdi</p> <ul style="list-style-type: none"> • Pareti verdi • Sistema di facciata produttivo • Sistema di produzione di alghe in facciata <p>Tetti verdi</p> <ul style="list-style-type: none"> • Tetti verdi estensivi • Tetti verdi intensivi • Tetti verdi estensivi con pannelli solari • Tetti verdi su pensiline delle fermate degli autobus • Tetti verdi intensivi con meccanismi di accumulo idrico • Tetti verdi produttivo • Tetti verdi abitabili 	<p>Raccolta delle acque meteoriche negli edifici</p> <ul style="list-style-type: none"> • Raccolta delle acque meteoriche in sifone esterno con superficie verde depurativa • Raccolta delle acque meteoriche in sifone interrato con superficie verde depurativa • Raccolta delle acque meteoriche in sifone interrato • Raccolta delle acque meteoriche in sifone esterno <p>Fontane per il microclima</p> <ul style="list-style-type: none"> • Fontane in mezzo a rotonde • "Fontane" verticali <p>Pavimentazione permeabile</p> <ul style="list-style-type: none"> • Parcheggi fortemente permeabili • Porzioni permeabili in aree impermeabili adibite a parcheggio • Aree pubbliche • Raccolta delle acque meteoriche in vasche di laminazione • Materiale permeabile • Raccolta delle acque meteoriche in sede stradale

Tabella 2.3 Soluzioni di adattamento nel campo della progettazione e pianificazione suggerite da diverse fonti nazionali e internazionali con riferimento agli impatti climatici definiti dal progetto

2.2.4 Quali risultati ed effetti?

La UCAIF (*Urban Climate Action Impacts Framework*, Documento Quadro per gli impatti nell'azione urbana per il clima) è un documento di riferimento sviluppato dalla rete C40, con l'obiettivo di stimolare a livello globale un approccio basato su dati, misurazioni e osservazioni per l'azione di adattamento.

Una componente fondamentale di tale documento quadro è costituita da un tentativo di tassonomia per la classificazione e la definizione degli impatti del cambiamento climatico in diversi settori e da una ampia raccolta di indicatori suddivisi su più livelli. Tale approccio supporta la conclusione del percorso logico che lega una progettazione adattata ai cambiamenti climatici con un'efficace azione complessiva di adattamento al cambiamento stesso.

Riprendendo a titolo esemplificativo l'obiettivo "aumento della copertura verde", si propone il diagramma di percorso (Figura 2.3), secondo l'approccio UCAIF, a partire dal settore o ambito di applicazione, fino a identificare il legame con i rischi climatici che vengono affrontati, passando attraverso gli elementi *azione* (le misure messe in atto con l'intento di raggiungere un obiettivo di adattamento), *prodotto* (*output*, il prodotto diretto dell'azione: l'attivazione di un servizio, la costruzione di una struttura o infrastruttura, uno strumento finanziario), *risultato* (*outcome*, il cambiamento generato dal prodotto dell'azione, necessario alla realizzazione dell'effetto desiderato).

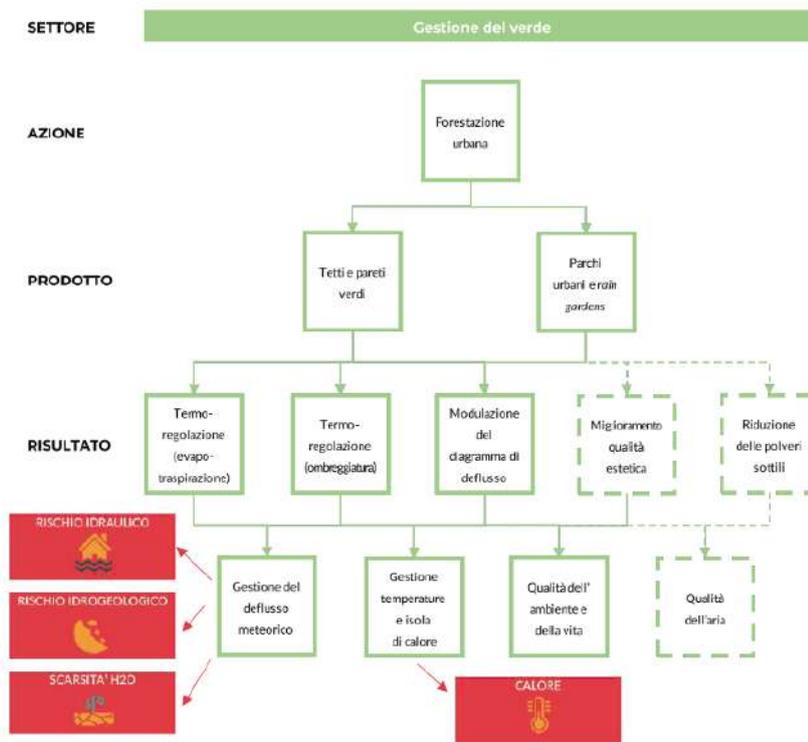


Figura 2.3 Esempio di percorso di adattamento secondo la metodologia UCAIF C40 con riferimento agli effetti di una azione di adattamento nel campo della progettazione/pianificazione e a i suoi effetti rispetto agli impatti climatici

2.2.5 Strumenti e piattaforme europee, nazionali e locali per l'adattamento climatico e la resilienza in ambiente urbano

Ad ogni livello istituzionale si possono trovare progetti, strumenti e piattaforme con lo scopo di informare e divulgare metodi utili all'adattamento per il cambiamento climatico negli ambienti urbani. A livello europeo, è importante evidenziare la Piattaforma Europea per l'Adattamento Climatico Climate-ADAPT⁵, prodotta e gestita dall'Agenzia Europea per l'Ambiente EEA, in cooperazione con la Commissione Europea (Direzione Generale CLIMA). Tale piattaforma ha lo scopo di rendere accessibili e condividere dati ed informazioni sui cambiamenti attesi in Europa, le vulnerabilità regionali, le strategie e azioni di adattamento nazionali, transnazionali e locali, i casi studio e gli strumenti per il supporto alla pianificazione dell'adattamento. Climate-ADAPT comprende un database di facile accessibilità che contiene tutta l'informazione verificata in materia e nel quale è possibile condividere ulteriore materiale scientifico a scopo divulgativo.

⁵ <https://climate-adapt.eea.europa.eu/>

A livello nazionale è d'obbligo segnalare l'esistenza della piattaforma GELSO⁶ (GEstione Locale per la SOstenibilità), progetto dell'Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale ISPRA che risponde all'esigenza di avere a disposizione una banca dati sulle buone pratiche per la sostenibilità locale. Vuole essere uno strumento di lavoro a disposizione delle Pubbliche Amministrazioni, delle associazioni ambientaliste, dei tecnici, dei consulenti ambientali, dei cittadini e di tutti coloro che siano interessati a quanto di innovativo si stia facendo nel campo dello Sviluppo Sostenibile. La piattaforma punta a divulgare e a promuovere un approccio integrato alla sostenibilità a partire da temi che rappresentano nodi chiave per le politiche ambientali di scala locale come l'economia circolare, le smart cities e i cambiamenti climatici. GELSO ha l'obiettivo di individuare, valutare e diffondere le buone pratiche di sostenibilità attuate in Italia e le proposte di nuove buone pratiche vengono selezionate in base a specifici criteri di ammissibilità secondo un metodo aperto e inclusivo. Tra i progetti censiti sono stati selezionati principalmente quelli attivi nell'ultimo quinquennio e che sono coerenti con i macrotemi che concorrono alla realizzazione degli obiettivi strategici indicati dall'Unione Europea per accelerare la transizione ecologica e, al tempo stesso, rafforzare la resilienza dei territori e promuovere la coesione sociale. Tra le diverse attività pertinenti a tali obiettivi è stato inserito nella piattaforma di GELSO anche il progetto ClimaMi⁷.

Infine, restringendo il campo a livello locale, è importante segnalare il progetto LIFE MetroADAPT e la piattaforma DECI.METRO Sistema DECISIONALE - città METROPolitana di Milano.

In particolare, **Metro Adapt**⁸ ha perseguito l'obiettivo di integrare le strategie di cambiamento climatico nella Città Metropolitana di Milano, promuovendo la creazione di una solida governance relativa al cambiamento climatico che sia comune a tutte le autorità locali e a produrre gli strumenti che permettano loro di implementare efficienti misure di adattamento. Il sistema **DECI.METRO**⁹ invece, è la nuova piattaforma istituzionale per la consultazione e la concertazione di informazioni geografiche, topografiche e sociali relative ai comuni appartenenti al territorio metropolitano milanese. Tali informazioni sono organizzate nella forma di Database Topografico (DBT), che permette analisi ed approfondimenti tematici. Il portale comprende vari servizi tra i quali:

- consultare informazioni topografiche
- esaminare dati ambientali
- gestire indirizzi stradali e numeri civici collegati agli edifici

⁶ <http://gelso.sinanet.isprambiente.it/>

⁷ http://gelso.sinanet.isprambiente.it/scheda_progetto.html?id=progetto-climami-climatologia-per-le-attivit-professionali-e-ladattamento-ai-cambiamenti-climatici-urbani-nel-milanese

⁸ www.lifemetroadapt.eu

⁹ <https://www.cittametropolitana.mi.it/DeCiMetro/DBT/>

- creare statistiche mediante indicatori socio-economici
- partecipare a progetti di concertazione di informazioni territoriali

2.3 Gli ambiti di applicazione del progetto ClimaMi e gli impatti del cambiamento climatico

Il capitolo 4 delle presenti Linee Guida si soffermerà sulla descrizione dell'uso degli indicatori climatici sviluppati dal progetto in una serie di ambiti di applicazione definiti dal progetto.

Tali ambiti sono:

	<i>Progettazione di edifici (involucro, impianti)</i>
	<i>Energia (relativamente al consumo energetico)</i>
	<i>Gestione dei deflussi meteorici</i>
	<i>Pianificazione territoriale</i>
	<i>Gestione del verde pubblico</i>
	<i>Salute pubblica e il benessere termoigrometrico</i>

A completamento del ragionamento fin qui presentato, la Tabella 2.4 pone in relazione gli impatti di riferimento identificati dal Piano Nazionale di Adattamento ai Cambiamenti Climatici con gli ambiti di azione definiti da ClimaMi, laddove si ravvisi un potenziale beneficio derivante da un'attività di progettazione o pianificazione. Si rimanda al capitolo 4 per il dettaglio degli ambiti di applicazione.

2.4 Considerazioni conclusive: l'uso di dati e indicatori quantitativi nell'ambito professionale per l'adattamento

Come è già stato ricordato prima, la sfida del clima è una sfida sistemica. Il sistema città-clima è un organismo complesso, con molti livelli di interazione, interdipendenze e correlazioni (ad esempio, una infrastruttura blu-verde può allo stesso tempo avere effetti sulla temperatura, sulla ritenzione idrica, sull'ombreggiatura e il benessere delle persone, sulla qualità dell'aria), ma anche un alto livello di specificità, al punto che misure di adattamento in ambiente urbano possono essere progettate a livello di strada, di quartiere, di area o intera città e, non meno importante, in rapporto all'ambiente extra-urbano che circonda la conurbazione.

Individuati gli impatti specifici che provengono dalla crisi climatica e insistono su una certa area e identificati a loro volta i fattori climatici a monte di questi (grandezze fisiche e variabili

fondamentali), si può allora, come dimostrano alcune delle trattazioni sopra citate, attraverso “progettazioni resilienti”, adattate e adattative:

- creare ambienti a maggior resilienza a quegli stessi fattori climatici e quindi agli impatti che ne derivano
- influenzare gli stessi fattori che, a quella scala, contribuiscono a determinare il clima e a caratterizzare l'ambiente a livello urbano, di strada, quartiere, ecc.

L'uso di dati e di indicatori richiede tuttavia che il professionista che si accinga ad utilizzarli si ponga alcune questioni fondamentali, affinché l'uso ne sia corretto, efficace ed efficiente.

	Edificio - Impianto	Energia	Deflusso meteorico	Pianificazione	Gestione del verde	Salute e benessere
Insedimenti urbani						
1. Peggioramento della salute e del benessere insediativo della popolazione	•	•	•	•	•	•
2. Riduzione dei momenti di socialità e peggioramento della qualità di vita			•	•	•	•
3. Aumento dei danni alle infrastrutture e ai beni culturali e paesaggistici			•	•		
4. Aumento degli allagamenti con impatti su infrastrutture, salute, attività economica e servizi			•	•	•	
5. Variazione della biodiversità urbana e peggioramento delle condizioni per le aree verdi			•	•	•	
6. Aumento dei problemi di approvvigionamento idropotabile			•	•		
7. Problematiche per il rifornimento di energia	•	•				
8. Danni al sistema socioeconomico			•	•		•
9. Aumento dei costi per le istituzioni pubbliche	•	•	•	•	•	•
Salute						
1. Aumento dei rischi dovuti a frane, incendi ed eventi meteorologici estremi			•	•		
2. Aumento delle patologie legate alle alte temperature e alla radiazione solare	•	•		•		•
3. Aumento delle patologie allergiche respiratorie (asma)				•	•	•
4. Aumento delle patologie trasmesse da vettori artropodi						
5. Aumento del rischio di esposizione a contaminanti chimici				•	•	
6. Compromissione della sicurezza alimentare						
7. Compromissione della disponibilità e qualità alimentare ed aumento dei costi						
8. Aumento dei costi di prestazioni ambientali e sanitarie			•	•		•
9. Aumento dei costi in ambito lavorativo	•	•		•		•
10. Aumento del rischio di tossinfezioni alimentari						
11. Aumento delle infezioni trasmesse con l'acqua						
12. Peggioramento delle prestazioni dei servizi idrici			•	•		
13. Cambiamento del comfort microclimatico negli ambienti interni	•	•		•		•
Trasporti e infrastrutture						
1. Aumento dei danni da calore						
1.1. Espansioni termiche a strutture (ponti/viadotti)						
1.2. Surriscaldamento e deformazione e delle strutture ed infrastrutture di trasporto				•		
2. Aumento dei danni da eventi meteorologici estremi o loro conseguenze						
2.1. Allagamento delle infrastrutture di trasporto terrestri						
2.2. Aumento del rischio di scivolamento per pavimentazioni bagnate				•	•	
2.3. Cedimento di argini e terrapieni ed erosione alla base dei ponti			•	•	•	
2.4. Impatti indiretti legati alla stabilità dei versanti						
2.5. Valanghe e frane						

2.6. Allagamento di sistemi ipogei						
3. Riduzione dei danni da basse temperature				.		
4. Aumento dei disagi per il trasporto aereo				.		
5. Aumento dei disagi per la navigazione delle acque interne				.		
6. Erosione alla base dei ponti				.		
Turismo						
1. Modifica del valore paesaggistico del territorio				.	.	.
2. Aumento dei rischi per la salute dei turisti	.		.			.
3. Variazione della stagione turistica						
4. Cambio del tipo di attività svolte				.		
5. Variazione dell'attrattività e cambio delle destinazioni turistiche			.	.	.	
6. Modifica delle condizioni per il turismo lacustre				.		
7. Aumento dei costi dei servizi turistici e dei relativi prezzi		.				
8. Aumento delle situazioni di carenza idrica						
9. Aumento del turismo montano estivo				.		

Tabella 2.4 Tavola sinottica della relazione tra ambiti di applicazione professionale e impatti del cambiamento climatico (come definiti dal Piano Nazionale di Adattamento al Cambiamento Climatico)

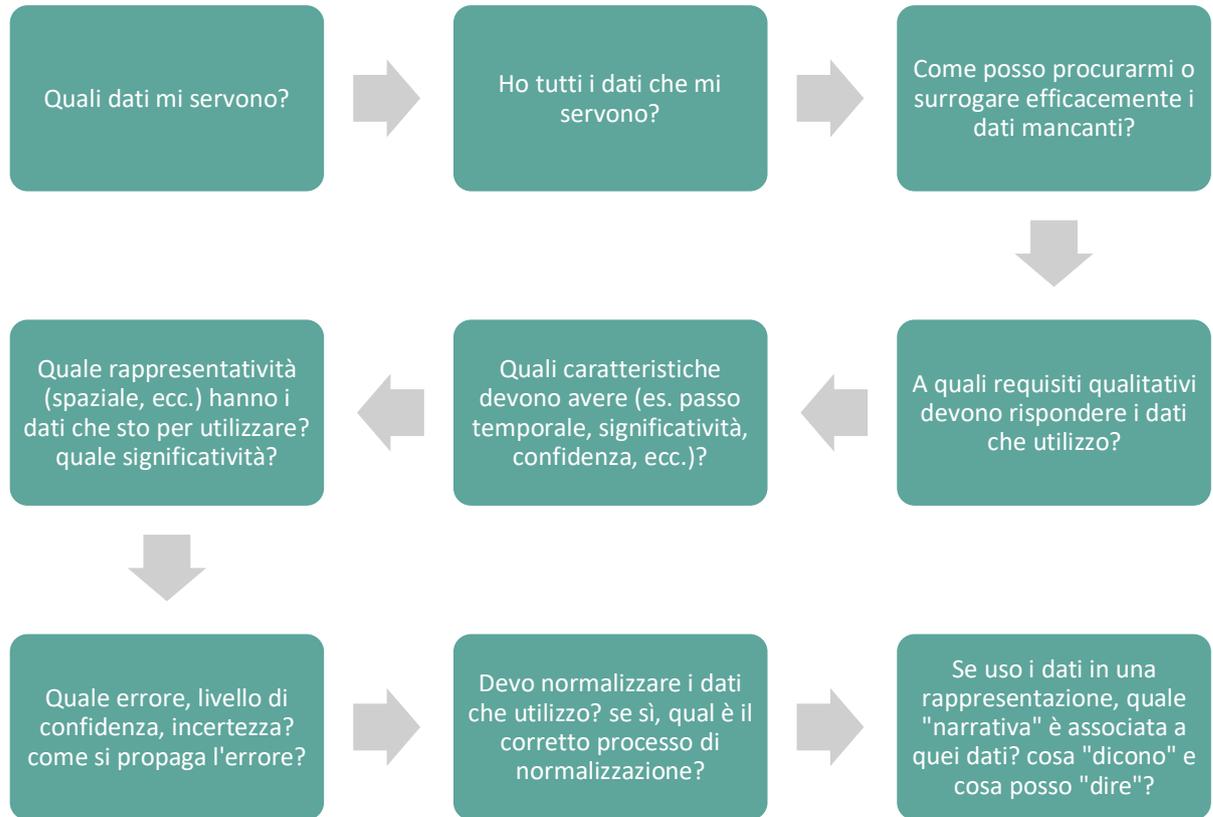
“Un indicatore va oltre i semplici dati per mostrare le tendenze o le relazioni di causa-effetto; è quindi una variabile osservabile utilizzata per rendere conto di una realtà non osservabile.

Uno stesso indicatore può essere utile a chiarire diversi temi di studio. D'altra parte, ad un concetto non corrisponde necessariamente un solo indicatore. Nella maggior parte dei casi, si utilizzano, per un singolo tema di studio, più indicatori.”¹⁰

Gli indicatori in generale semplificano i fenomeni complessi e forniscono le informazioni essenziali sul piano ambientale, sociale o economico con l'obiettivo di aumentare la sensibilità e la comprensione, di fornire informazioni utili alle decisioni, di misurare i progressi verso il raggiungimento di obiettivi prefissati.

Lo schema riportato sotto tratteggia una sequenza logica di alcune domande possibili.

¹⁰ <http://observatoire.espace-mont-blanc.com/it/indicatori>



Nei capitoli successivi, si entrerà nello specifico delle grandezze e degli indicatori climatici investigati nell'ambito del progetto ClimaMi, per l'area metropolitana di Milano e per i possibili settori di applicazione nell'ambito tecnico e professionale.



3. IL CLIMA E GLI INDICATORI NELL'AMBIENTE URBANO

Il presupposto all'informazione climatologica applicativa è costituito innanzitutto dalla conoscenza sufficientemente dettagliata della climatologia urbana e della sua evoluzione temporale. Da questa informazione primaria è poi possibile derivare una serie di indicatori climatici di diretto uso applicativo, che ne permettano un impiego corretto nei vari contesti delle attività progettuali e pianificatorie in ambito urbano.

La misura continuativa e documentata delle variabili meteorologiche in area urbana costituisce la base da cui ottenere una corretta climatologia.

3.1 Clima e cambiamento climatico: definizioni e dati

La comprensione del clima su aree di limitata estensione, come quelle urbane, richiede un chiarimento sulla definizione stessa di clima e un suo inquadramento nei fenomeni a più ampia scala spaziale, dal globale al regionale.

Il primo aspetto è trattato nel Box 2 che introduce le definizioni basilari utili ad evitare possibili e frequenti errori interpretativi, **distinguendo innanzitutto tra tempo meteorologico e clima.**

Box 2. Definizioni di base e distinzione tra TEMPO METEOROLOGICO e CLIMA

Tempo e meteorologia

Il tempo meteorologico:

- è lo stato istantaneo e locale dell'atmosfera, descritto in termini fisici da variabili misurabili quali: pressione, temperatura, umidità, velocità e direzione del vento, radiazione solare, precipitazioni
- ha un'elevata variabilità giornaliera o di breve-medio periodo (ora, giorno, mese, anno)
- la sua osservazione (tramite stazioni meteorologiche in superficie, sondaggi verticali, satelliti dedicati, radar e altro) e la sua previsione (tramite i modelli numerici) rientrano nelle attività della meteorologia operativa

Esempi: un temporale in atto, condizioni di nebbia su una certa area ad una certa ora, condizioni di cielo sereno e vento calmo al mattino su una certa località, l'Anticiclone delle Azzorre che staziona per più giorni sulle nostre regioni, le temperature medie ed estreme di un singolo giorno o stagione in una località.

Clima e climatologia

Il clima:

- è l'insieme delle condizioni medie del tempo locale, regionale o globale, rispetto ad uno specifico intervallo temporale molto più lungo di quello del tempo meteorologico, data l'elevata variabilità di quest'ultimo
- ha una variabilità temporale molto più lenta, pluriennale (decenni, trentenni)
- è derivato dalle analisi statistiche sulle misure istantanee del tempo meteorologico (valori medi ed estremi, anomalie, ecc.), estese a più anni consecutivi; tali analisi sono compito della climatologia, che definisce le condizioni medie ed estreme del tempo alle varie scale spaziali con riferimento al mese, alla stagione, all'anno del periodo pluriennale considerato

Esempi: la temperatura massima estiva di una località negli ultimi 30 anni, il totale delle precipitazioni autunnali mediamente cadute negli ultimi 30 anni.

Data l'elevata variabilità del tempo meteorologico dalla scala giornaliera a quella annuale, i dati climatici devono essere calcolati su periodi molto più lunghi.

Secondo l'Organizzazione Meteorologica Mondiale (WMO), l'Agenzia delle Nazioni Unite preposta a meteorologia e climatologia, **il clima è definito su base trentennale**: i cosiddetti Climate Normals CLINO. Alcune indicazioni del WMO:

- CLINO aggiornati ogni decennio (1981-2010, 1991-2020, ...) per definire il clima attuale a scopi operativi;
- CLINO attuale (CLINO 1991-2020) rispetto ai precedenti non sovrapposti (CLINO 1961-1990, 1931-1960, ...) per valutare il cambiamento climatico in corso.

Il trentennio è dunque il periodo che la climatologia ha finora utilizzato, a livello internazionale, per definire il clima.

Ragioni applicative settoriali, come si vedrà nei successivi paragrafi e capitoli, e **la velocità con cui il cambiamento climatico si sta manifestando stanno inducendo a calcolare dati climatici anche su periodi pluriennali inferiori al classico trentennio**.

Il clima ha una dinamica temporale lenta, i cosiddetti **cambiamenti climatici**, che deve essere valutata insieme ai fattori che la governano.

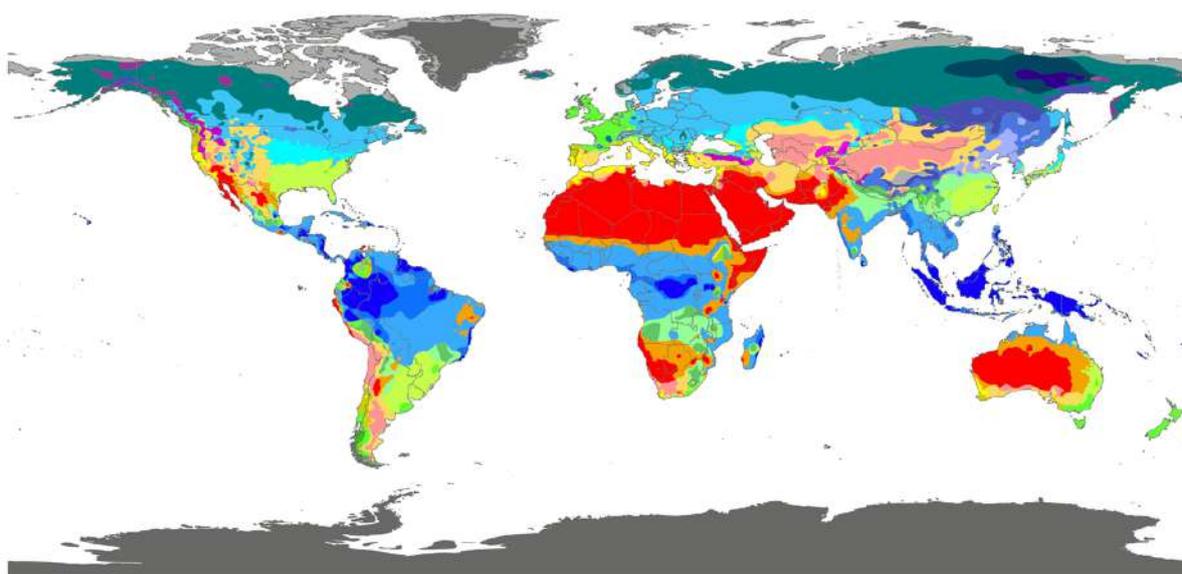
Tali fattori sono innanzitutto legati alla **scala spaziale**, su cui agiscono diverse **forzanti naturali oltreché antropiche**. Sintetizzando, si può definire il clima rispetto tali scale e forzanti:

- **clima globale**, in funzione principalmente della fonte primaria di energia (il Sole), dell'orbita terrestre, dell'inclinazione dell'asse di rotazione della Terra e relative perturbazioni periodiche (causa di glaciazioni e interglaciazioni del passato), delle caratteristiche morfologiche e fisiche della superficie terrestre, delle proprietà chimico-fisiche e radiative dell'atmosfera; a tale livello agisce l'**effetto serra**, ovvero il fenomeno di regolazione della temperatura del pianeta grazie alla presenza dell'atmosfera in cui si accumula una parte dell'energia termica derivante dal Sole per effetto della presenza nell'atmosfera stessa di alcuni gas, detti appunto "gas serra" (CO₂, CH₄, N₂O, CFC, ...)
- **clima regionale**, condizionato dalle forzanti astronomiche, dalla geografia e dalla chimica-fisica del sistema atmosfera-oceani peculiari delle diverse regioni del globo; la Figura 3.1 ne riporta una delle classificazioni più utilizzate in diverse discipline tecniche e scientifiche, quella di Köppen-Geiger

- **clima locale**, in cui al clima regionale si sommano le interferenze dovute alle caratteristiche geomorfologiche del luogo e, in ambito urbano, il contributo antropogenico legato all'urbanizzazione

L'area territoriale del Progetto ClimaMi, localizzata nella Pianura Padana, è caratterizzata da un clima regionale temperato umido con estate calda (zona "Cfa" nella classificazione di di Köppen–Geiger, Fig. 3.1), dove la temperatura media del mese più caldo supera i 22 °C. In tale area e con riferimento al periodo analizzato dal Progetto ClimaMi (2013-2020), le città di Milano, Legnano e Lodi hanno registrato una temperatura del mese più caldo rispettivamente di 26.4 °C, 25.3 °C e 25.7 °C.

Classificazione climatica mondiale secondo il sistema Köppen–Geiger



Af	BWh	Csa	Cwa	Cfa	Dsa	Dwa	Dfa	ET
Am	BWk	Csb	Cwb	Cfb	Dsb	Dwb	Dfb	EF
Aw	BSk	Cwc	Cfc	Dsc	Dwc	Dfc		
				Dsd	Dwd	Dfd		

FONTE: Stazione dati GHCN v.2.0
Temperatura (N=4,844) e
Precipitazioni (N=12,396)

PERIODO RILEVAZIONE: tutti i disponibili

RILEVAZIONE MINIMA: 30 per ogni mese

RISOLUZIONE: 0.1 gradi lat/long

Contact : Murray C. Peel (mpeel@unimelb.edu.au) for further information

Figura 3.1 La distribuzione dei climi terrestri secondo lo schema classico di Köppen – Geiger (fonte: Peel MC, Finlayson BL & McMahon TA, 2007. Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification, Hydrol. Earth Syst. Sci. 11, 1633-1644)

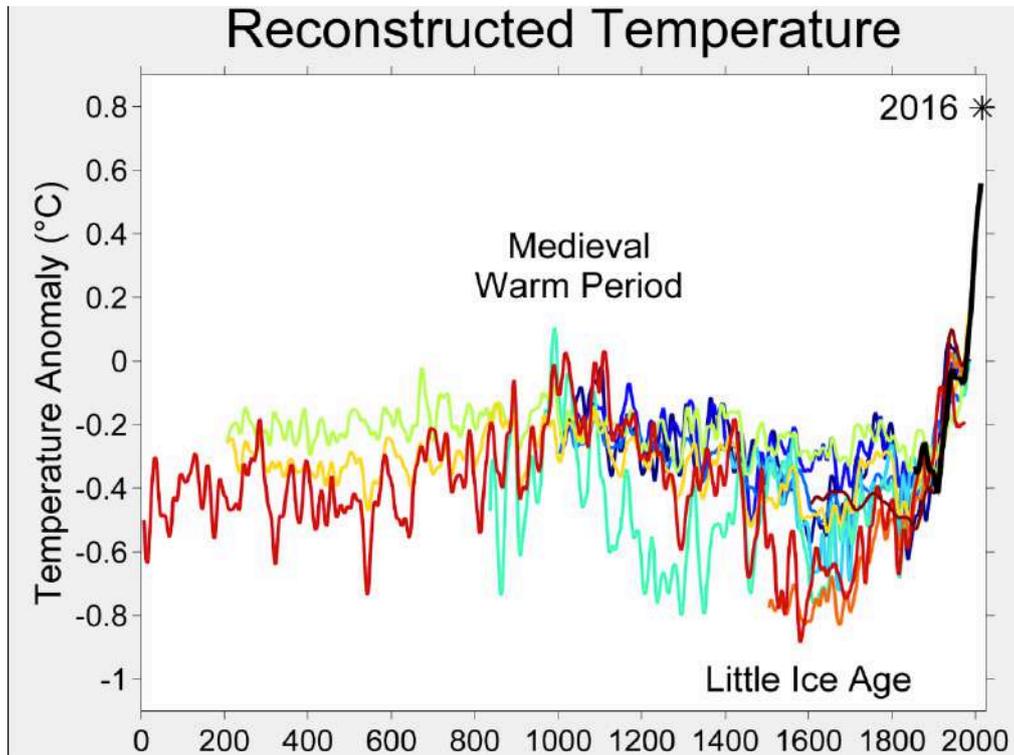


Figura 3.2 Ricostruzione della temperatura media della Terra negli ultimi 2000 anni (fonte: Robert A. Rohde, https://commons.wikimedia.org/wiki/File:2000_Year_Temperature_Comparison.png)

Una variazione della temperatura globale, come quella del **cambiamento climatico in atto negli ultimi decenni**, produce inevitabilmente conseguenze anche sul clima regionale. Vengono infatti alterate le circolazioni atmosferiche e, di conseguenza, le frequenze dei diversi tipi di tempo meteorologico che, nel lungo periodo, definiscono il clima locale. Le variazioni del clima negli ultimi 2000 anni sono riassunte nella Figura 3.2, che riporta l'anomalia di temperatura dell'aria a livello planetario (ovvero la differenza rispetto ad un periodo di riferimento): risulta evidente il veloce riscaldamento degli ultimi decenni.

Questo riscaldamento medio si distribuisce sulla superficie terrestre in maniera irregolare e cambia anche in funzione della stagione: la Figura 3.3 illustra la distribuzione spaziale dell'aumento di temperatura sull'area europea osservata in un trentennio recente, distintamente per le medie annue e quelle stagionali (inverno/estate).

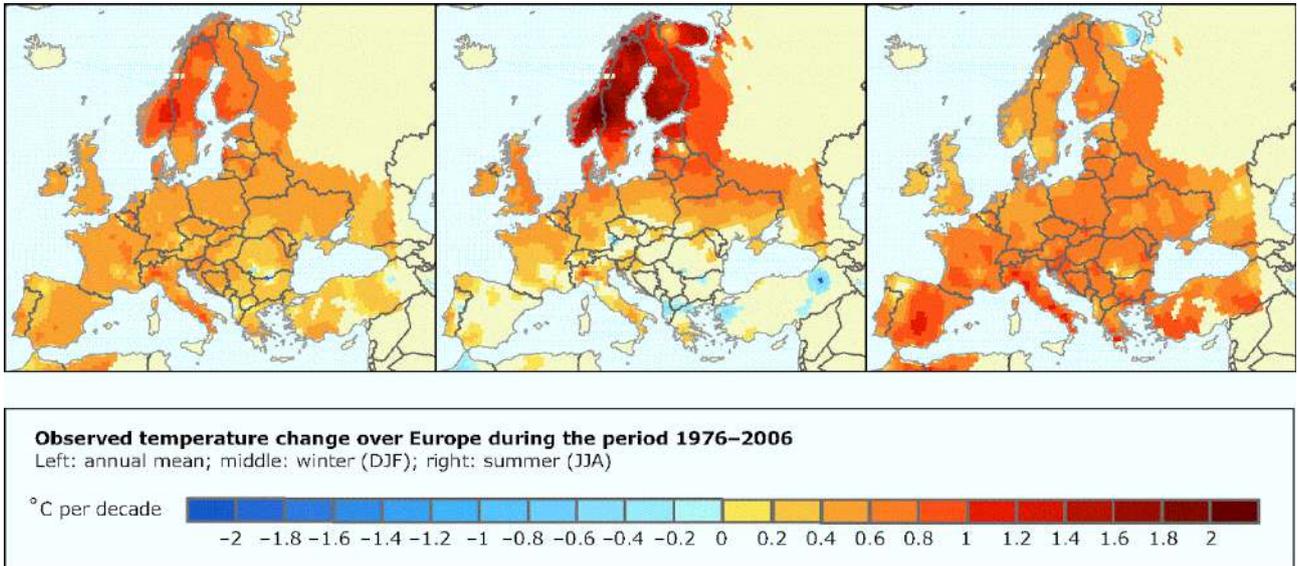


Figura 3.3 Distribuzione spaziale in Europa dell'aumento delle temperature medie osservate in 30 anni (da sinistra: medie annue, invernali ed estive; fonte: Royal Netherlands Meteorological Institute (KNMI), 2008, <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/figures/observed-temperature-change-over-europe-1976-2006/map-5-1-climate-change-2008-observed-temperature-change.eps> (DOI: 10.13140/RG.2.2.13705.19046))

Risulta evidente il riscaldamento della penisola italiana e in particolare della Pianura Padana occidentale, in quest'ultima area sia d'estate che d'inverno.

Se si considera il periodo più recente per il quale sono disponibili misure dirette delle temperature alla superficie terrestre, **l'aumento delle temperature medie**, sia a scala globale che regionale, appare ancora più evidente ed è chiaramente caratterizzata da un'**accelerazione negli ultimi decenni** (Figure 3.4, 3.5; Box 3). La penisola italiana appare soggetta ad un riscaldamento superiore alla media globale e questo è ulteriormente accentuato nell'area urbanizzata milanese, come attesta la serie storica delle misure urbane di temperatura dell'aria in Milano (Fig. 3.6).

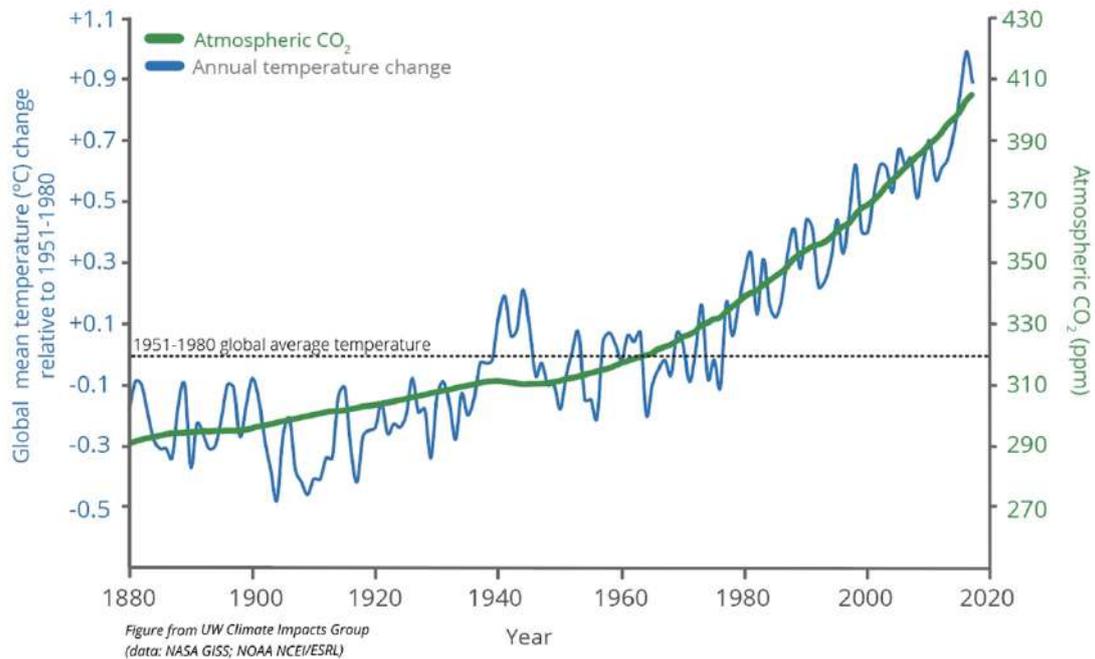


Figura 3.4 Anomalie di temperatura dell'aria e di concentrazioni aerodisperse di CO2 dal 1880 ad oggi (Fonte: NASA, NOAA)

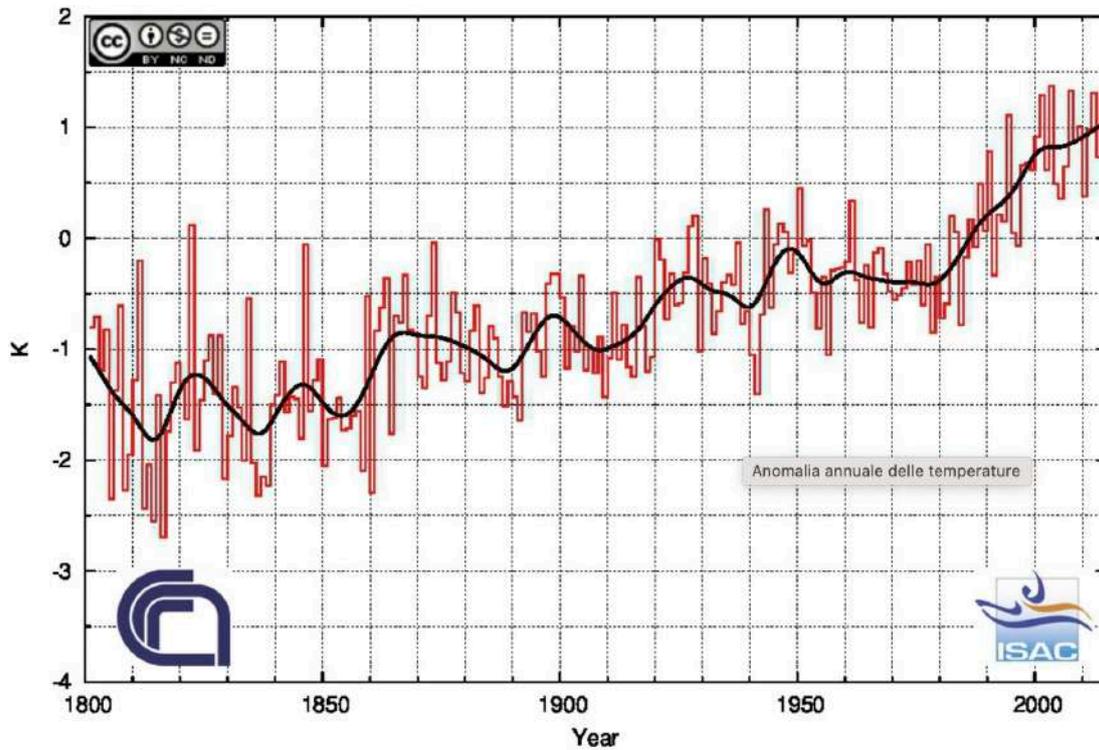


Figura 3.5 Anomalie di temperatura dell'aria in Italia dal 1800 ad oggi (Fonte: CNR ISAAC)

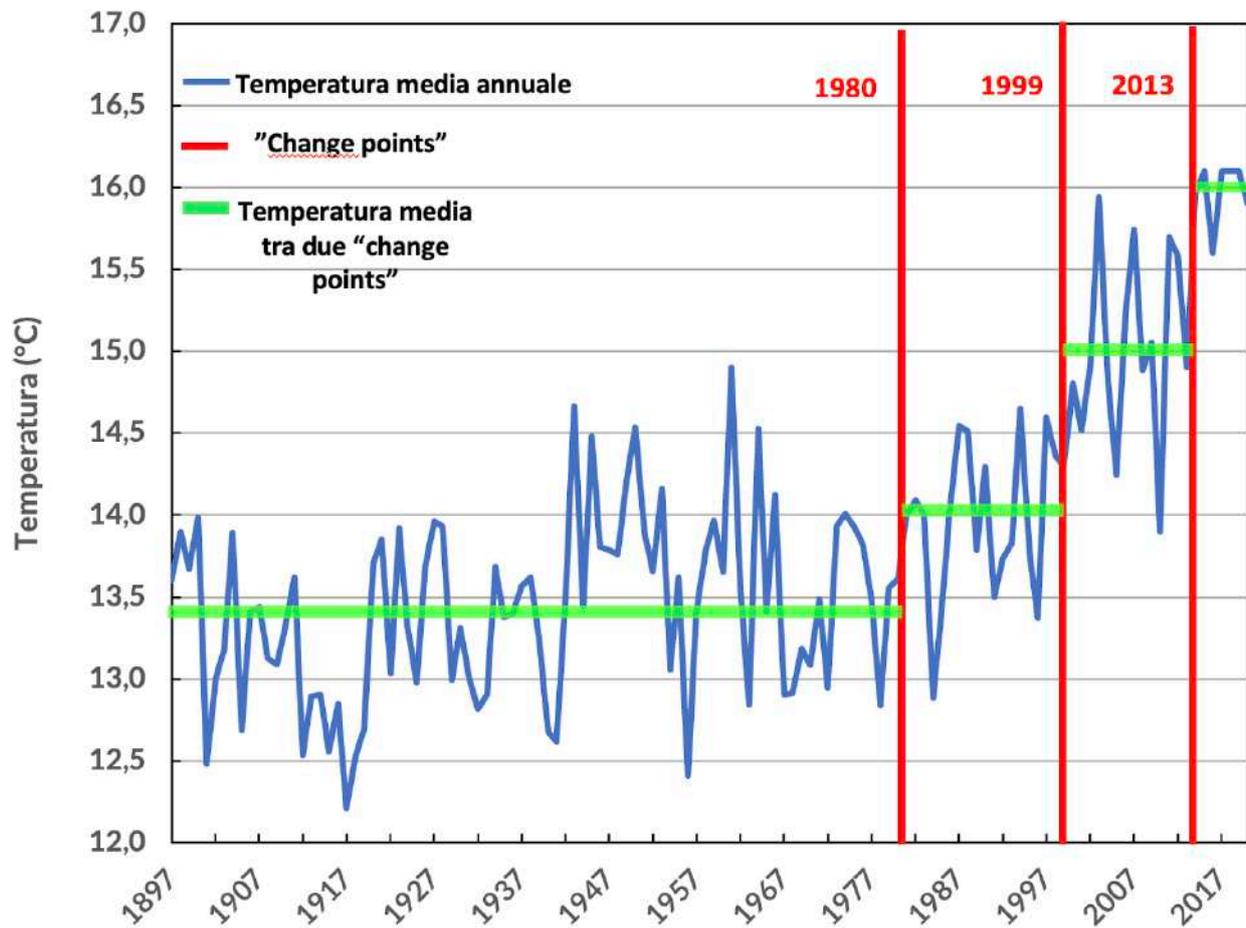


Figura 3.6 Temperatura dell'aria a Milano Centro dal 1897 al 2020 (fonte: progetto ClimaMi)

La Figura 3.6 è utile per distinguere la **normale variabilità meteorologica interannuale** (la differenza tra i diversi valori annui di temperatura media, in blu, che oscillano intorno a medie di lungo periodo, in verde) e il **cambiamento del clima** (la differenza tra le medie pluriennali, in verde). Fino al 1980 circa, al di là della variabilità meteorologica con massimi e minimi legati all'anno più o meno freddo/caldo, si è verificata una sostanziale costanza del valor medio di lungo periodo. Successivamente si è palesata un'evidente non-stazionarietà dei valori annui di temperatura: le finestre temporali per il calcolo di una media pluriennale significativa si sono accorciate rapidamente (pochi decenni e poi pochi anni) e le medie pluriennali si sono alzate.

La **velocità con cui questo cambiamento del clima si sta verificando** costituisce una vera e propria **Emergenza Climatica per l'umanità** (Box 3).

Box 3. CAMBIAMENTO CLIMATICO ed EMERGENZA CLIMATICA

La velocità con cui l'attuale cambiamento del clima si sta verificando, in maniera inedita nella storia recente e passata del pianeta nonché a livello sia globale che locale, costituisce una vera e propria emergenza per l'umanità.

Scienziati prima, comunicatori e politici dopo, hanno iniziato a riferirsi all'attuale tasso di cambiamento climatico con i termini di EMERGENZA o CRISI CLIMATICA.

Anche i termini utilizzati sono importanti, perché denotano la presa di coscienza del problema e delle sue conseguenze.

Tutti sono chiamati, nel proprio operato professionale nonché di comportamento personale, ad affrontare altrettanto velocemente la crisi climatica in termini di Mitigazione all'emissione di gas serra in atmosfera e di Adattamento locale al cambiamento climatico in corso.

3.2 Il clima urbano e l'isola di calore

L'aumento delle temperature medie osservate a Milano si inquadra in modo coerente nel riscaldamento climatico regionale italiano ed europeo, ma presenta una significativa accentuazione la cui origine va ricercata nella specificità delle aree urbane. L'urbanizzazione introduce effetti complessi negli scambi di calore suolo-atmosfera di origine tipicamente antropogenica.

Il **clima urbano** è dunque la somma di **due effetti sovrapposti**:

- **il riscaldamento globale**, attivo con la scala e le tempistiche a livello regionale/continentale (Figg. 3.4, 3.5)
- **il contributo antropico locale** determinato dalla crescita urbanistica, che varia più rapidamente in funzione delle scale spazio-temporali dell'urbanizzazione e delle sue caratteristiche (Figg. 3.6, 3.7)

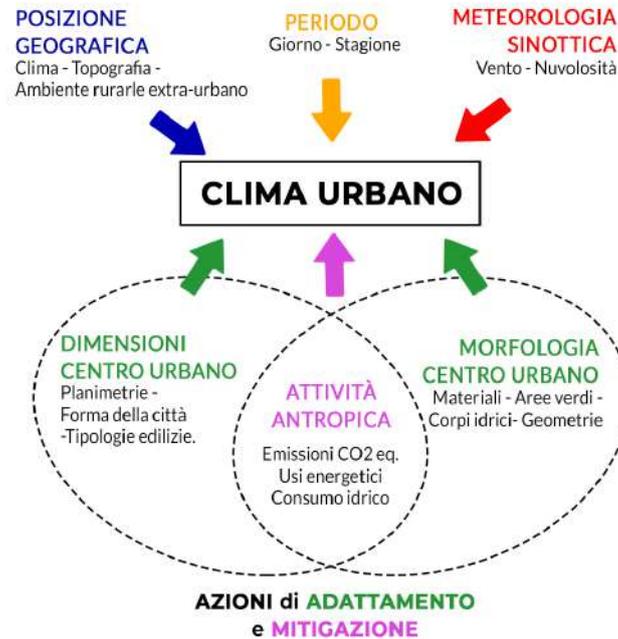


Figura 3.7 Clima urbano: fattori naturali e antropogenici influenzanti

Il clima urbano si differenzia da quello extra urbano principalmente a causa delle diverse caratteristiche morfologiche (natura fisica e geometria delle superfici edificate) e fisiologiche (produzione di calore e impermeabilità del suolo in primo luogo) della città rispetto all'ambiente naturale circostante. La principale conseguenza è il cosiddetto fenomeno dell'**Isola di Calore Urbana (UHI Urban Heat Island)**, per cui l'area cittadina è sovrastata nei bassi strati atmosferici da aria significativamente più calda rispetto a quella delle zone circostanti extraurbane. La Figura 3.8 illustra schematicamente in sezione il profilo della temperatura al di sopra di un'area urbanizzata.

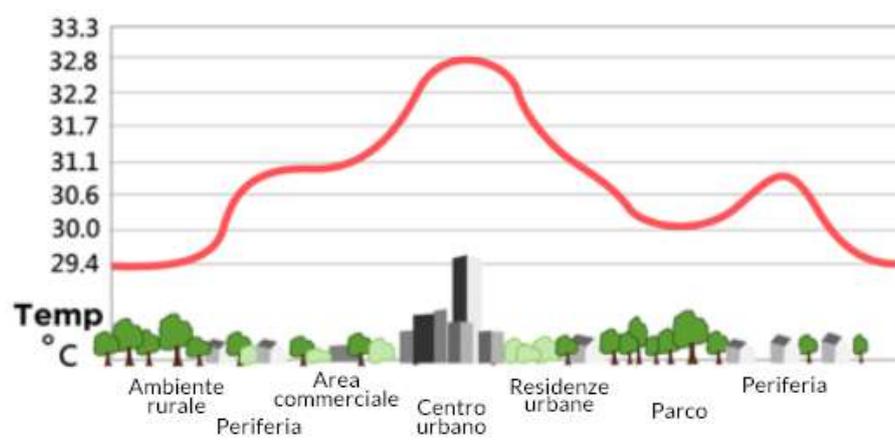


Figura 3.8 Sezione del profilo di temperatura al di sopra di un'area urbanizzata (Oke, 2017)

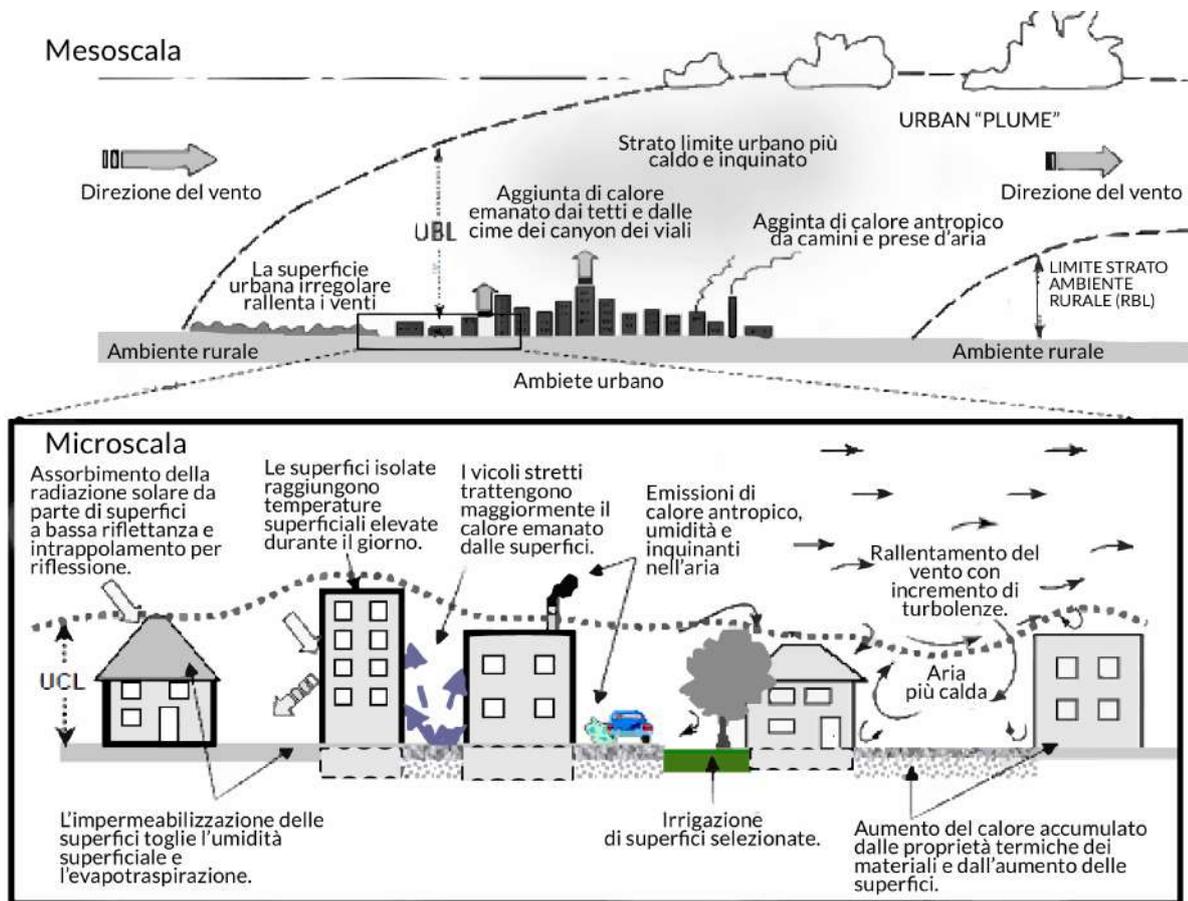


Figura 3.9 Sintesi dei processi che avvengono nell'atmosfera urbana all'origine del fenomeno dell'Isola di Calore (tratto da Voogt, 2004)

Le cause dell'Isola di Calore Urbana risiedono, a parità di condizioni meteorologiche:

- nella generazione di calore antropogenico in città, dovuto ad attività economiche e sociali (produzioni industriali, riscaldamento e raffrescamento degli ambienti di vita e lavoro, traffico autoveicolare, ecc.);
- nella diversa velocità di raffreddamento notturno tra superfici orizzontali urbane e rurali, dovuta alla diversa emissività;
- nella capacità termica delle superfici urbane esposte alla radiazione solare, che hanno in genere una minore albedo;

- negli effetti geometrici che aumentano l'efficienza del riscaldamento radiativo diurno (Effetto Canyon Urbano), tramite riflessioni e assorbimenti principalmente da parte delle superfici verticali (pareti degli edifici);
- nell'attenuazione del vento nei cosiddetti canyon urbani;
- nell'impermeabilizzazione dei suoli che ne ostacola l'evapotraspirazione e quindi il raffreddamento associato alla produzione di calore latente.

Si tratta di fattori morfologici e fisiologici che possono variare fortemente da città a città, anche in funzione delle diverse caratteristiche geo-topografiche. La complessità dei processi implicati nel fenomeno, tra cui la circolazione indotta e la nuvolosità, è schematizzata in Figura 3.9. Si noti che la cupola d'aria calda che costituisce l'Isola di Calore, centrata in genere sulla città e con intensità massima in corrispondenza del centro cittadino (spesso indicata in inglese con il termine "dome"), può deformarsi estendendosi in un pennacchio (in inglese "*plume*") sottovento per effetto di una circolazione a più grande scala.

L'**intensità dell'Isola di Calore Urbana** è misurabile in termini di differenza di temperatura dell'aria tra città (T_u) e area rurale circostante (T_r) tramite l'indice I_{UHI} definito come:

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

La scelta del sito di misura della temperatura è cruciale in ambito urbano. Le temperature nei diversi strati della complessa atmosfera urbana possono variare significativamente sia lungo la verticale che orizzontalmente in funzione:

- dell'altezza di misura rispetto al piano stradale
- della localizzazione del punto di misura entro la città (quartiere)
- dall'effettiva esposizione dei sensori sensibili agli effetti delle superfici riflettenti o emittenti circostanti
- dalle condizioni di circolazione locale

Misure a livello strada in un "canyon urbano" non saranno in genere direttamente confrontabili con misure prese alla sommità della canopea urbana (lo strato d'aria al di sotto dell'altezza media di edifici e alberi), ad esempio sul tetto di un edificio o su una torre; ma anche il posizionamento in diversi punti di un terrazzo aperto alla sommità di un edificio può influire sulle misure in funzione della vicinanza a pareti verticali sottostanti orientate verso sud e soleggiate.

Il valore massimo di intensità dell'UHI è in genere legato alle dimensioni urbane, alla densità di popolazione e varia molto anche in funzione del tasso e del tipo di urbanizzazione. L'intensità è più accentuata in determinate condizioni meteorologiche e può talvolta anche assumere valori negativi.

Le condizioni meteorologiche favorevoli allo sviluppo di una pronunciata Isola di Calore sono caratterizzate da:

- cieli sereni o poco nuvolosi, che consentono un maggiore irraggiamento diurno e notturno;
- scarsa ventilazione su larga scala, che limita il rimescolamento verticale turbolento degli strati aerei cittadini;
- strato d'inversione termica (temperature maggiori in quota che non al suolo), che inibisce i moti verticali.

L'isola di calore, in termini di distribuzione spaziale e intensità, è fortemente variabile nel tempo anche in funzione della stagione e dell'ora; è generalmente più intensa nei mesi freddi, nelle ore serali e notturne.

Dal punto di vista spaziale, **l'intensità dell'Isola di Calore varia in funzione della distribuzione e della tipologia di edificato e copertura del suolo** nelle varie parti della città. Si può fare riferimento ad una classificazione morfologica della superficie cittadina proposta da Stewart e Oke¹¹ in Zone Climatiche Locali (Local Climate Zone LCZ), ampiamente utilizzata a livello internazionale. Questa classificazione, riassunta in Figura 3.10, è riconducibile a parametri morfologici misurabili e permette d'interpretare le misure dell'intensità dell'Isola di Calore in funzione delle caratteristiche di urbanizzazione.

¹¹ Stewart and Oke, 2012

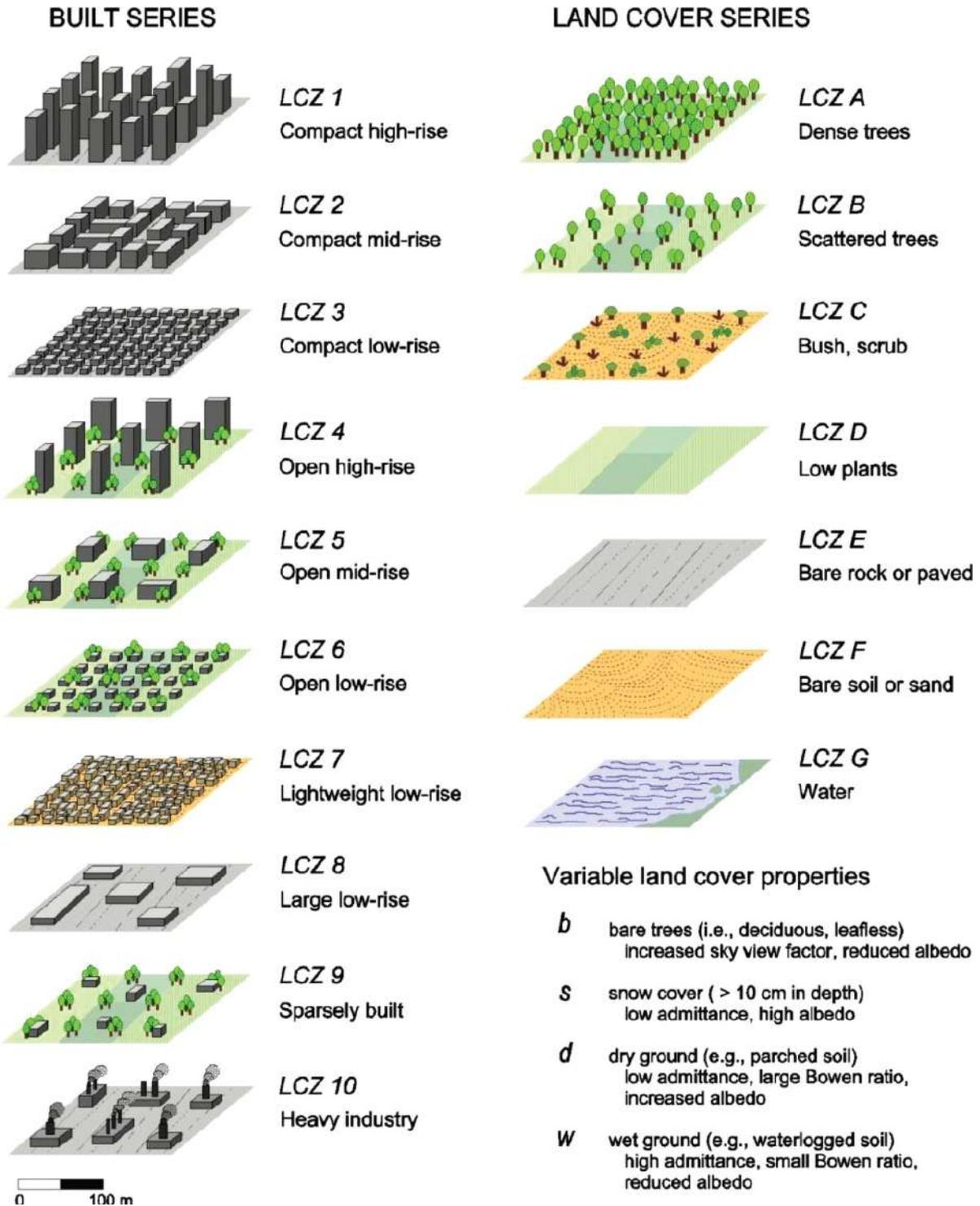


Figura 3.10 Schema della classificazione urbana in Zone Climatiche Locali (LCZ) (fonte: Iain D. Stewart, T. R. Oke, E. Scott Krayenhoff, Evaluation of the 'local climate zone' scheme using temperature observations and model simulations, 2013, <https://doi.org/10.1002/joc.3746>)

3.3 Le precipitazioni in ambiente urbano

Altro aspetto importante del clima urbano è quello relativo alle precipitazioni e associati allagamenti della superficie urbanizzata. Eventi pluviometrici intensi, a carattere di nubifragio e spesso di breve durata, sono sempre più frequenti. Ai fini della progettazione e della gestione del drenaggio delle acque meteoriche è necessaria una dettagliata conoscenza del regime pluviometrico locale, con particolare riferimento alla tipologia di precipitazione che più tipicamente può mettere in crisi il sistema idrico urbano.

Box 4. CLASSIFICAZIONE DELLE PIOGGE

Piogge CONVETTIVE

- caratteristiche: rovesci di forte intensità
- estensione spaziale: a carattere locale (pochi km)
- durata: generalmente limitata a poche ore
- origine: nubi a forte sviluppo verticale rispetto alla dimensione orizzontale, prodotte da condizioni di instabilità atmosferica (forte riscaldamento in superficie associato ad aria relativamente più fresca in quota) oppure le perturbazioni atmosferiche

Esempi: acquazzone, temporale

Piogge NON CONVETTIVE o AVVETTIVE

- caratteristiche: precipitazioni continue di debole-moderata intensità
- estensione spaziale: dalla scala locale alla mesoscala (decine-poche centinaia di km)
- durata: estesa anche a qualche giorno
- origine: sovrapposizione di masse d'aria dalle caratteristiche termodinamiche differenti (avvezione) che da luogo a nubi stratiformi ovvero più uniformi in senso orizzontale e meno sviluppate verticalmente

Esempio: perturbazione delle medie latitudini (fronte o sistema frontale)

Talvolta **precipitazioni avvevte e convettive possono coesistere** in una stessa perturbazione, nel caso l'avvezione operi in presenza di masse d'aria instabili. Piogge deboli e continue si alternano a rovesci intensi, temporali o grandinate

I millimetri di pioggia caduti in un'ora definiscono l'**Intensità di precipitazione**, che a titolo operativo viene distinta in:

- pioggia debole (1 – 2 mm/h)
- pioggia leggera (2 – 4 mm/h)
- pioggia moderata (4 – 6 mm/h)
- pioggia forte (> 6 mm/h)
- rovescio (> 10 mm/h)

- nubifragio (> 30 mm/h)

Box 5. MEDIE E CUMULATI DI PIOGGIA**Pioggia come variabile meteorologica:**

- le precipitazioni, a differenza della temperatura e delle altre variabili meteorologiche, non vanno mediate ma sommate nell'unità temporale di base (es. ora, giorno, mese, anno).

Esempi: 1798 mm di pioggia nell'anno 2014, 135 mm di pioggia il 27 luglio 2020

Pioggia come variabile climatica:

- i dati meteorologici di precipitazione orari, giornalieri, ..., annuali vengono mediatati per ottenere i corrispettivi valori climatici di lungo periodo (decennali, trentennali, ...)

Esempi: pioggia cumulata media annua di 956 mm nel trentennio 1971-2000

L'area del bacino aerologico milanese risulta interessata sia da perturbazioni frontali che da fenomeni di instabilità termica. In dettaglio il suo regime pluviometrico è caratterizzato da:

- una prevalenza di precipitazioni avverse nel semestre invernale, con massimi autunnali e primaverili dovuti al passaggio di perturbazioni più o meno intense e della durata di uno o più giorni;
- frequenti fenomeni convettivi estivi con rovesci intensi nelle ore tardo pomeridiane e serali, associati molto spesso al fenomeno del temporale con scariche elettriche e talvolta a grandine.

Dal punto di vista quantitativo, la media annua di lungo periodo (dato climatico, par. 3.1) si attesta attorno ai 1000 mm (956 mm presso la stazione sinottica WMO 16080 ubicata a Milano Linate nel trentennio 1971-2000¹²), con un minimo invernale ed un massimo autunnale. Le distribuzioni spaziali delle precipitazioni cumulate medie annue e medie estive nell'ultimo decennio (2013-2020) sono riportate nelle Figure 3.11 e 3.12.

¹² Atlante Climatico d'Italia 1971-2000 dell'Aeronautica Militare, <https://clima.meteoam.it/downloads.php>

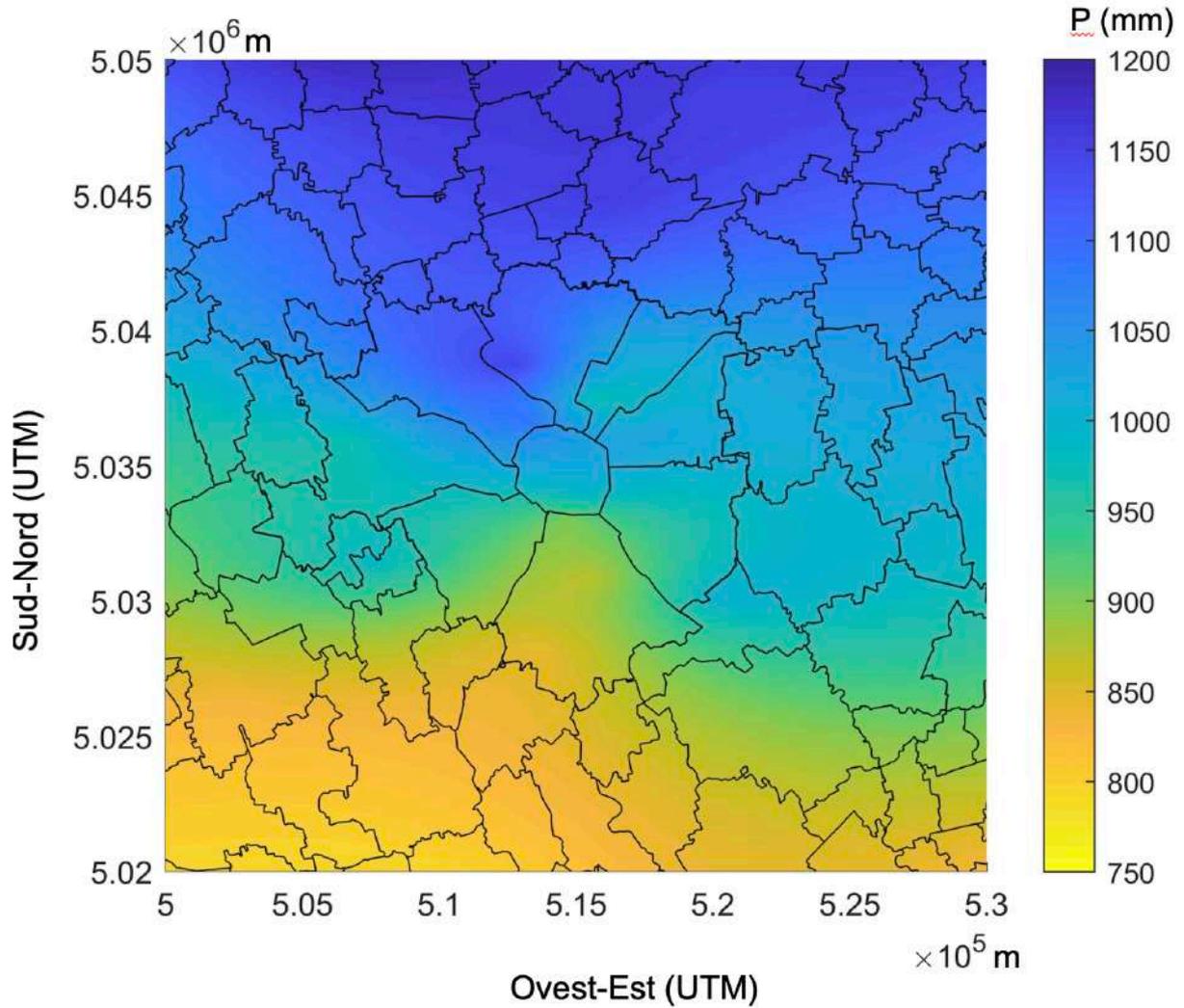


Figura 3.11 Precipitazioni cumulate medie annue nel milanese dal 2013 al 2020
 (fonte: progetto ClimaMi)

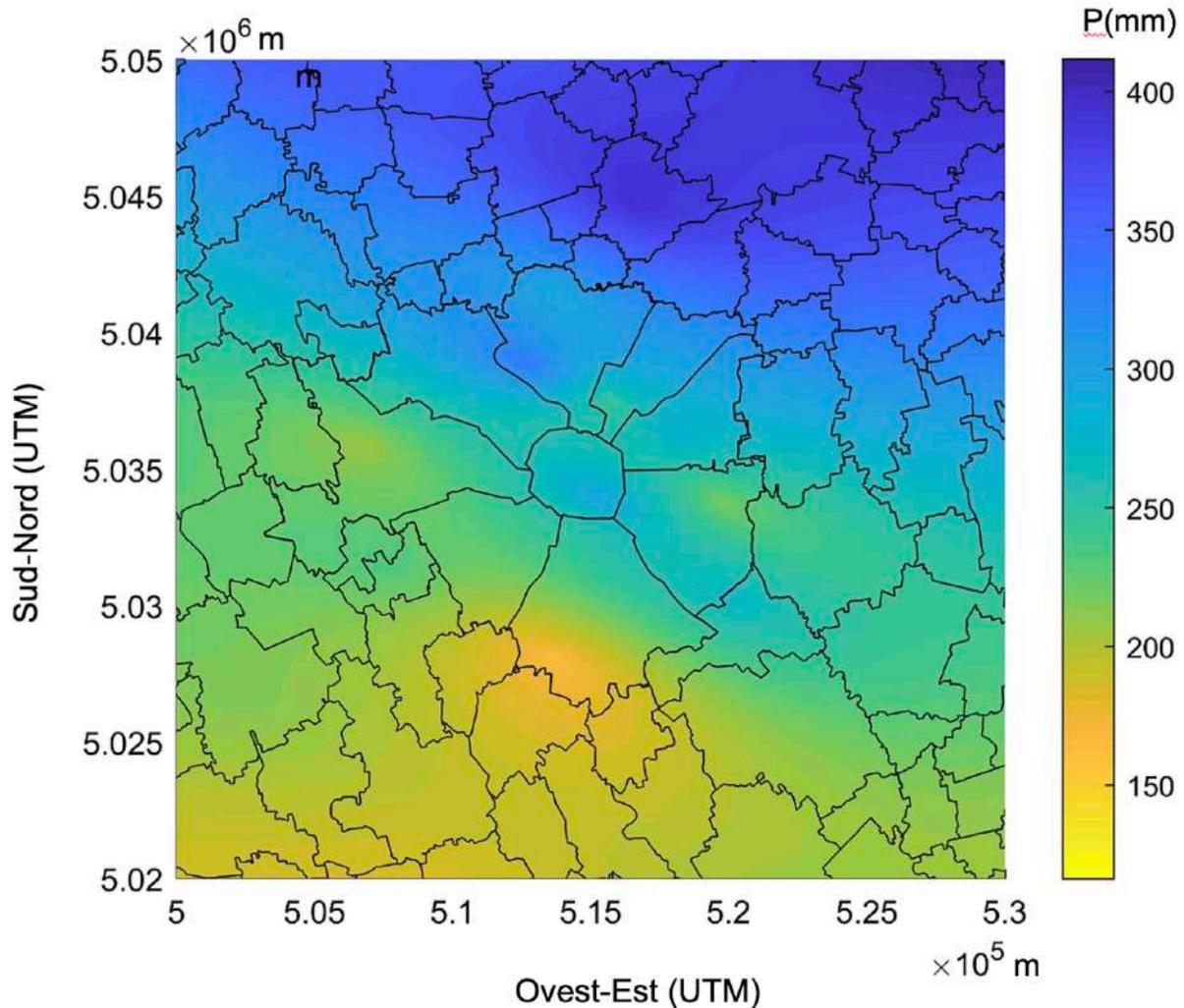


Figura 3.12 Precipitazioni cumulate medie estive nel milanese dal 2013 al 2020
(fonte: progetto ClimaMi)

Sia a livello annuo che stagionale **nel territorio milanese è presente un gradiente sud-nord di quantità di precipitazione**, che si riscontra **anche all'interno della stessa città di Milano**. Per il capoluogo lombardo, dunque, il dato di un'unica stazione meteo (es. quella di Milano Linate) non restituisce un quadro sufficientemente dettagliato del regime pluviometrico della città. La stessa cosa vale, in misura minore in rapporto alle dimensioni dell'urbanizzato, anche per gli altri centri abitati del territorio.

La Figura 3.13 riporta l'andamento della precipitazione cumulata annuale nella stazione di Milano Centro dal 1897 al 2020. A differenza dell'analogo trend della temperatura media annuale (Fig. 3.6), non si nota una variazione climatica statisticamente significativa.

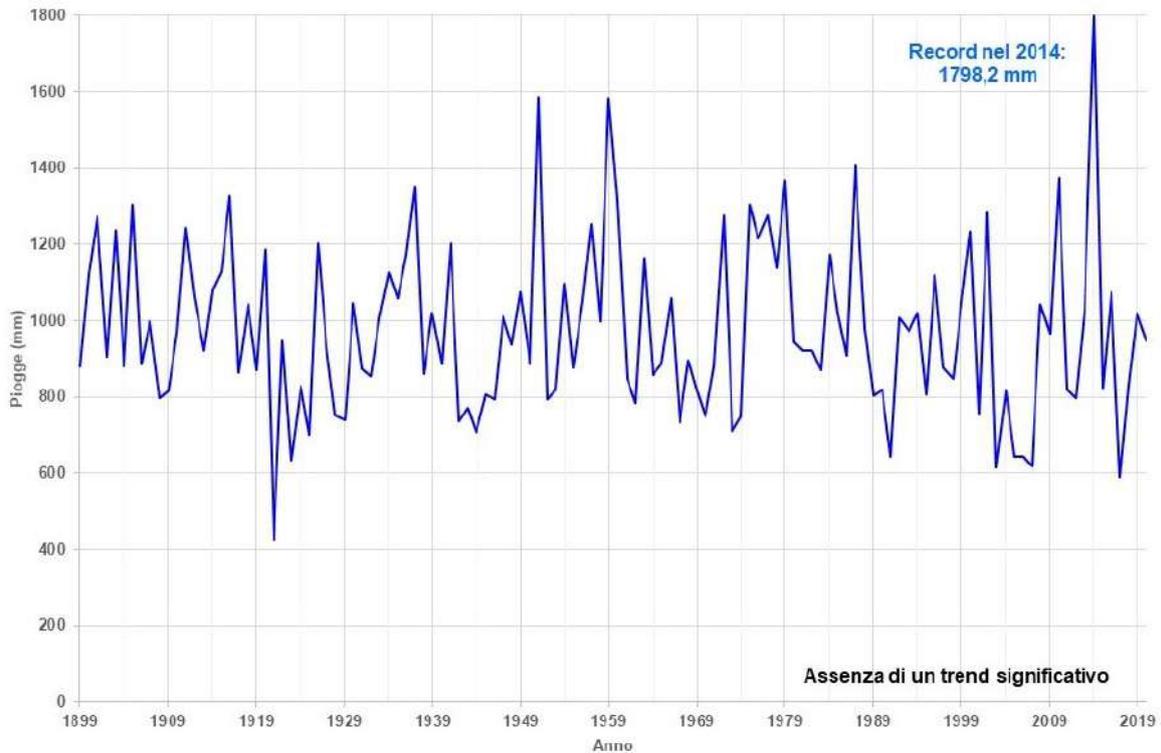


Figura 3.13 Precipitazioni cumulate medie annue in Milano Centro dal 1899 al 2020
(fonte: progetto ClimaMi)

In realtà, il cambiamento climatico sul regime pluviometrico si sta verificando: non tanto sui totali cumulati annui, ma su parametri quali l'intensità di pioggia, i giorni di pioggia, la durata delle precipitazioni.

Nel milanese (e non solo) si stanno infatti osservando¹³:

- una sostanziale costanza delle precipitazioni in termini di quantitativi caduti a livello annuo (Fig. 3.13)
- l'incremento dell'intensità di pioggia, al tasso di circa +1 mm/h ogni 6 anni
- la riduzione del numero annuo di giorni di pioggia¹⁴ al tasso di circa -1 giorno ogni 4 anni
- l'incremento della durata dei fenomeni di precipitazione (quando piove, piove più a lungo)
- l'incremento degli intervalli di tempo fra due eventi pluviometrici consecutivi (durata dei periodi siccitosi)

¹³ Consultare i moduli formativi del progetto ClimaMi dedicati alle precipitazioni per consultare le relative analisi statistiche, <https://www.progettoclimami.it/formazione>

¹⁴ si definisce GIORNO DI PIOGGIA il giorno con precipitazione cumulata (o altezza) maggiore o uguale ad 1 mm

La figura 3.14 esemplifica sia l'andamento mensile dell'intensità di pioggia in funzione della tipologia di precipitazioni avvelte e convettive (rif. Box 4) che l'incremento mese per mese che l'intensità di pioggia sta manifestando nel ventennio 1998-2018 man mano che si "isolano" periodi pluriennali più recenti. Sono stati considerati, quale base di calcolo, i dati meteo a 10 minuti per includere gli **eventi di pioggia brevi e intensi che stanno caratterizzando sempre più frequentemente il territorio provocando episodi di allagamento urbani.**

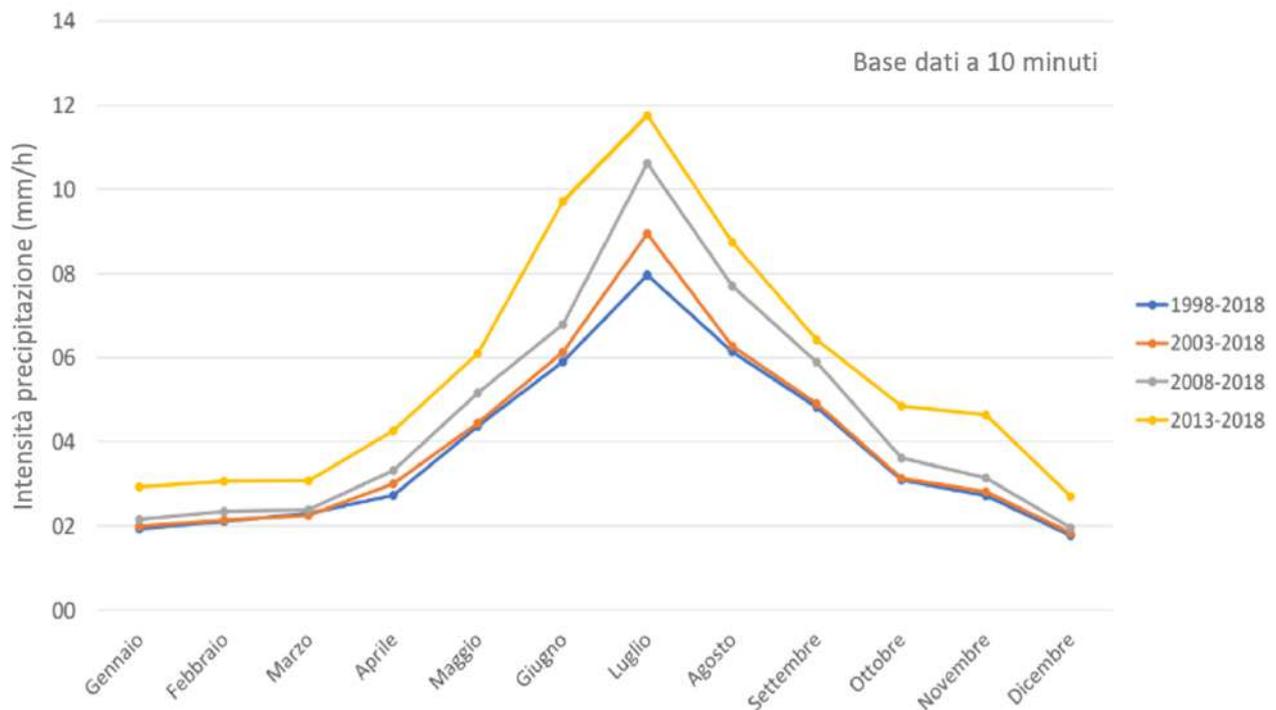


Figura 3.14 Intensità di precipitazione medie mensili in Milano Centro dal 1998 al 2018 per diverse finestre temporali (fonte: progetto ClimaMi)



4. USO DEGLI INDICATORI CLIMATICI

4.1 Introduzione agli indicatori climatici

Gli eventi meteorologici e il clima influenzano gran parte delle attività umane.

In molti casi è possibile esprimere tale influenza mediante funzioni o attraverso relazioni empiriche che permettono di quantificare la dipendenza di una grandezza di interesse da un dato parametro meteorologico o climatico e quindi l'impatto sulla stessa di un fenomeno meteorologico estremo, della normale variabilità meteorologica nonché di una variazione climatica.

Si pensi, a titolo esemplificativo, al settore energetico delle rinnovabili e alla mancanza di vento o sole in una o più giornate (variabilità meteo) che può ridurre la produzione di energia eolica/solare prevista (clima): la stessa formula (il rendimento d'impianto) fornisce la produzione attuale di energia elettrica se impiego i valori di temperatura e radiazione solare che caratterizzano il tempo meteorologico in atto oppure la produzione di energia attesa da progetto se utilizzo i dati climatici locali delle medesime variabili fisiche.

In altri casi l'influenza di meteo e clima non può essere quantificata, neanche empiricamente, ma la relazione comunque sussiste a livello qualitativo e l'informazione meteo-climatica costituisce un elemento importante di supporto alle decisioni.

4.2 Ambiti di applicazione in ambiente urbano

Nel progetto ClimaMi sono stati analizzati sei settori di attività professionale che hanno uno stretto legame con il clima e che afferiscono alle aree di possibile e auspicabile intervento in chiave di adattamento delle città agli impatti della crisi climatica:

	<i>Progettazione edificio-impianto</i>
	<i>Energia e consumi</i>
	<i>Deflussi meteorici urbani</i>
	<i>Pianificazione territoriale</i>
	<i>Gestione Verde urbano</i>
	<i>Salute pubblica e benessere termoigrometrico</i>

4.2.1 Progettazione edificio-impianto

L'analisi delle condizioni climatiche locali è indispensabile per minimizzare il consumo energetico dell'edificio e massimizzare le condizioni di benessere dei suoi occupanti. Si applica sia alle nuove costruzioni che al parco edilizio già esistente, ad esempio per:

- il dimensionamento degli impianti di climatizzazione

- il dimensionamento dell'involucro
- i processi di diagnosi, monitoraggio e ottimizzazione delle prestazioni energetiche

Per poter effettuare analisi dettagliate del sito **in fase di progettazione e per i dimensionamenti del sistema edificio-impianto** si utilizzano specifici indicatori climatici oltre ai valori medi ed estremi mensili ed annuali di temperatura, precipitazioni e radiazione solare. Tra questi, sono presenti nel Database ClimaMi:

- il **Giorno medio mensile**, ovvero i 24 valori medi orari delle variabili meteorologiche fondamentali rappresentativi dell'andamento giornaliero medio per ciascun mese dell'anno, utile nella fase di analisi parametrica (può essere utile per la *Simulazione Dinamica del sistema*);
- la **Temperatura esterna invernale di progetto per gli edifici con involucro pesante o normale**, per il dimensionamento degli impianti tecnici per la climatizzazione invernale (es. calcolo della potenza di picco dell'impianto di riscaldamento), corrispondente alla temperatura a cui, nella stagione invernale (dic-gen-feb), corrisponde una frequenza cumulata del 97,5% dove per "frequenza cumulata" s'intende la percentuale dei valori orari di temperatura che risultano superiori ad un determinato limite (i.e. solo il 2,5% delle temperature orarie è inferiore alla *temperatura esterna invernale di progetto*) (Figura 4.1);

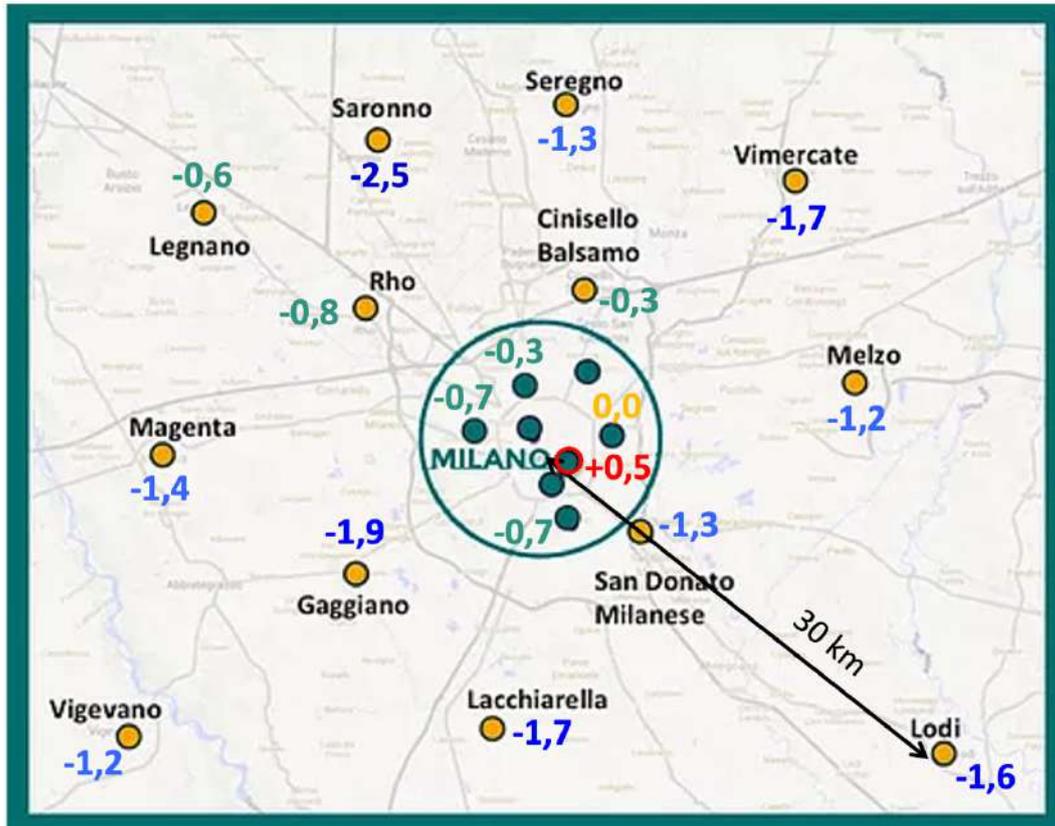


Figura 4.1 Temperature di progetto invernali per involucri normali/pesanti (progetto ClimaMi)

- la **Temperatura esterna invernale di progetto per gli edifici con involucro leggero**, per il dimensionamento degli impianti tecnici per la climatizzazione invernale (es. calcolo della potenza di picco dell'impianto di riscaldamento), corrisponde una frequenza cumulata del 99% dove per "frequenza cumulata" s'intende la percentuale dei valori orari di temperatura che risultano superiori ad un determinato limite (i.e. solo l'1% delle temperature orarie è inferiore alla temperatura esterna invernale di progetto);
- la **Temperatura esterna estiva di progetto**¹⁵, per il dimensionamento degli impianti tecnici per la climatizzazione estiva, corrispondente alla media delle temperature massime giornaliere nel periodo estivo;
- l'**Escursione giornaliera di temperatura**, sia massima assoluta che media delle massime, per diversi dettagli temporali (decadale, mensile, stagionale e annuale);
- la **Radiazione solare media giornaliera e massima estiva e invernale**, per il calcolo del carico dei sistemi di raffrescamento, della quantità di calore che l'involucro edilizio è in grado di

¹⁵ la Temperatura esterna estiva di progetto, nel Database ClimaMi, corrisponde all'indicatore Temperatura media delle massime giornaliere nei dettagli temporali Stagionale (estate) o Mensile (luglio, agosto)

guadagnare dall'esterno attraverso le superfici vetrate, del dimensionamento di sistemi passivi/attivi di riscaldamento (serra solare, muro di Trombe, *roof pond*/ solare termico), per la progettazione di sistemi fotovoltaici e la valutazione del livello di illuminamento naturale;

- l'**Umidità relativa**, media e massima mensile e stagionale;
- la **Rosa dei venti in 16 settori**, in aggiunta alla direzione prevalente e alla velocità media del vento, con dettaglio mensile e stagionale oltreché annuale, per un calcolo più dettagliato della resistenza termica dell'involucro edilizio (coefficienti di convezione), del carico per infiltrazione attraverso l'involucro;
- i **Gradi Giorno** totali della stagione termica invernale del territorio coperto da ClimaMi (15 ottobre - 15 aprile, DPR 412/93) e mediati sul periodo 2013-2020;
- i **Gradi Giorno Estivi** totali della stagione termica estiva (giugno - agosto) e mediati sul periodo 2013-2020 (si veda Appendice D - Nota Metodologica).

Tra gli strumenti di analisi utilizzati nelle attività di diagnosi/efficientamento energetico e di ottimizzazione nella gestione degli impianti di riscaldamento, in cui si utilizzano indicatori climatici (**Temperatura media dell'aria esterna, Gradi Giorno**), si citano:

- l'analisi del rapporto clima/Potenza Termica Edificio PTE (Fig. 4.2)
- l'analisi del consumo unitario per Grado Giorno - Consumo per Unità Climatica CUC

L'analisi del consumo unitario medio di combustibile di un edificio viene rapportato ai Gradi Giorno (reali e sito riferiti) ottenendo una efficace e sintetica indicazione, il CUC (kWh/GG), indipendente dalle condizioni climatiche stagionali. L'andamento del CUC in una data stagione di riscaldamento rispetto ad una baseline o ad un benchmark interno/esterno fornisce le seguenti informazioni:

- andamento non costante orizzontale: ottimizzazione necessaria a livello gestionale
- andamento quasi costante ma maggiore di quello target: necessità interventi di miglioramento (coibentazione, adeguamento potenza impianto, ecc.).

POTENZA TERMICA EDIFICIO (PTE)

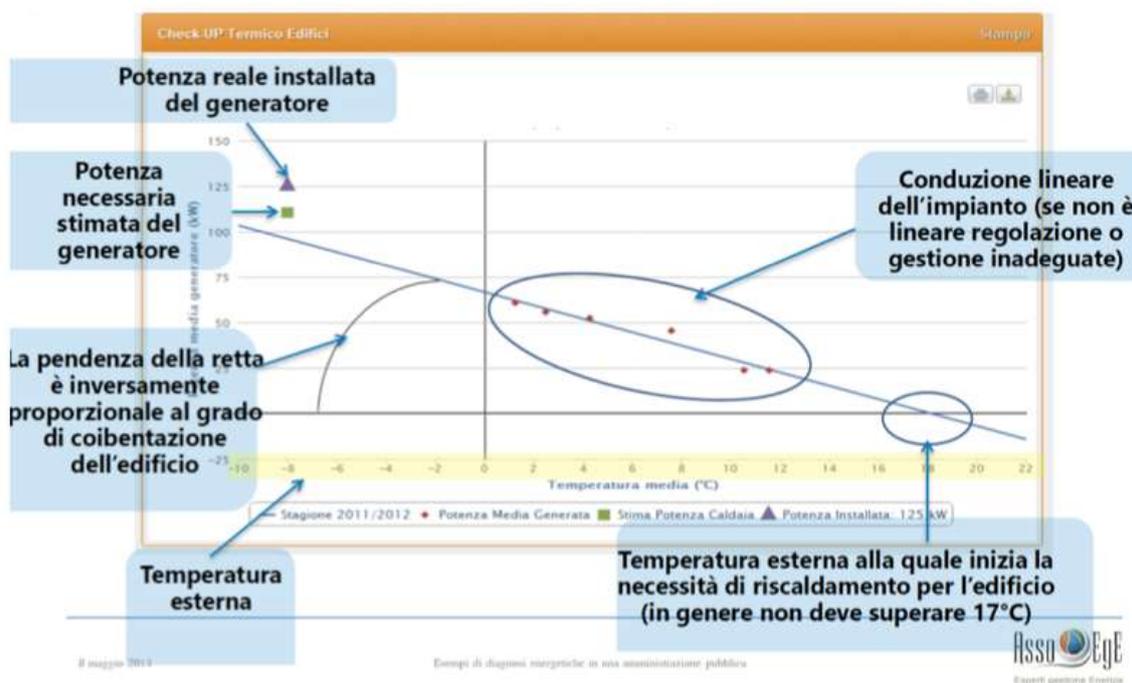


Figura 4.2 Rappresentazione grafica del consumo energetico o del fabbisogno di calore dell'edificio per stagione termica in funzione della temperatura esterna (metodo UNI EN 15603)

4.2.2 Energia e consumi energetici

Quando si parla di consumi energetici in ambito urbano, si fa riferimento ad una molteplicità di attività relazionate a vario titolo al clima e ai suoi indicatori. In particolare, ci si riferisce ai cosiddetti consumi HVAC (*Heating, Ventilation, Air Conditioning*), che interessano trasversalmente industria, terziario e residenziale.

Si possono distinguere tre tipologie di attività e relativi indicatori climatici di "riferimento":

- contabilizzazione energetica
- efficientamento energetico
- gestione e monitoraggio del consumo energetico

Attività riconducibili alla **contabilizzazione energetica** sono riscontrabili nei seguenti segmenti:

- contrattualistica;
- fatturazione dei consumi;
- gestione e manutenzione degli impianti termici (riscaldamento e raffreddamento estivo).

I **contratti servizio energia** e i **contratti a prestazioni energetiche garantite** sono tra gli esempi più diffusi e significativi sia per il parco edifici pubblico che per quello privato residenziale. Nelle linee guida di settore^{16,17} (un esempio in Fig. 4.3) si richiama la necessità dell'uso di dati climatici locali.



Figura 4.3 Linee Guida sui contratti tipo servizio energia nel settore residenziale

L'indicatore climatico utilizzato è il **Grado Giorno**, definito dal vigente DPR 412/93 e s.m.i. come l'indicatore correlato al fabbisogno energetico da riscaldamento in funzione del clima della località specifica. Il DPR 412/93 attribuisce il dato climatico di 2404 Gradi Giorno a Milano e a quasi tutte le località ricadenti nell'area territoriale del progetto ClimaMi per la stagione termica invernale (dal 15 ottobre al 15 aprile - fascia climatica E).

Box 6. GRADI GIORNO, CONSUMI DI ENERGIA e PRESTAZIONI ENERGETICHE

Per valutare il risparmio energetico conseguito o la performance energetica di un impianto è corretto confrontare semplicemente i consumi energetici, ad esempio da riscaldamento, riferiti a due stagioni termiche invernali di cui una di riferimento? **NO**, può essere forviante!
A causa della forte variabilità meteorologica interannuale, stagioni invernali e stagioni estive che si susseguono nel corso di pochi anni raramente sono caratterizzate dagli stessi valori medi

¹⁶ [Efficienti e riscaldati: Contratto tipo servizio energia BASE e PLUS](#), CCIAA Milano Monza e Brianza 2014

¹⁷ [Linee Guida per un contratto Energy Performance Contract secondo il D.Lgs. 102/2014](#), ENEA 2014

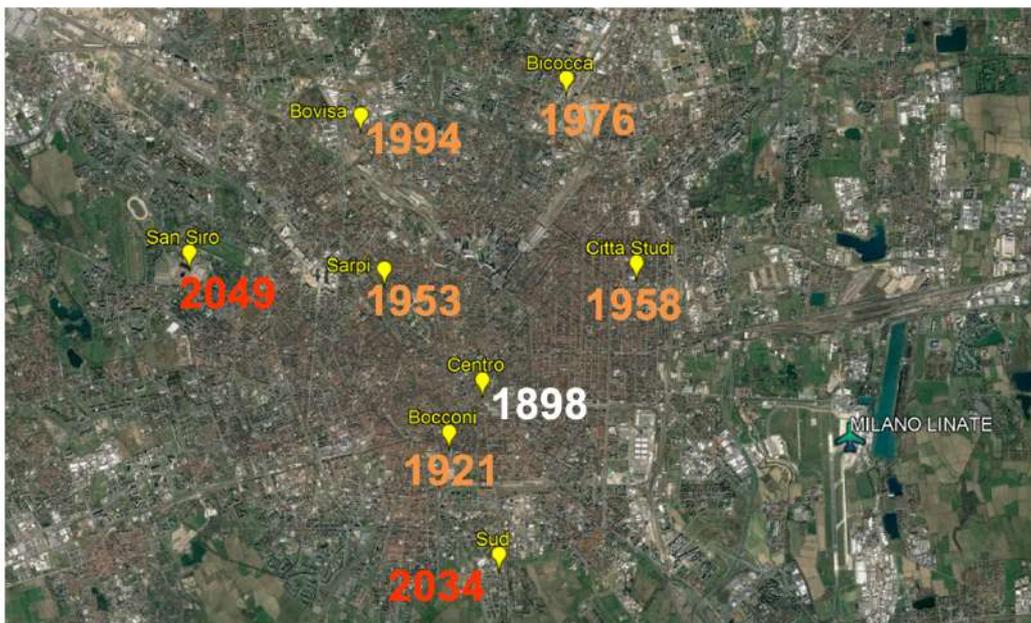
di temperatura: in genere si alternano inverni più o meno miti ed estati più o meno calde e afose, caratterizzati dunque da diverse esigenze di climatizzazione a parità di stagione.

IL DATO METEO-CLIMATICO È UN FATTORE INFLUENZANTE PRIMARIO DEL CONSUMO ENERGETICO PER CLIMATIZZAZIONE.

Senza considerare il dato climatico legato alla temperatura, e anche all'umidità d'estate nel caso di climi afosi come quelli del Val Padana, non si può stabilire se differenti consumi energetici siano imputabili a fattori meteo-climatici o a fattori impiantistici e valutare conseguentemente la prestazione energetica degli impianti.

I **Gradi Giorno GG di una località** corrispondono alla **somma estesa a tutti i giorni**, in un periodo annuale convenzionale di riscaldamento (stagione termica), delle sole **differenze positive giornaliere tra la temperatura indoor di confort**, fissata convenzionalmente per ogni Paese (20°C in Italia, **DPR 412/93**), e la **temperatura media esterna giornaliera**. L'unità di misura è in °C.

GG - valore medio per stagione termica



➔ **DPR 412/93: 2404 GG per Milano e comuni limitrofi**

Figura 4.4 Indice di fabbisogno energetico da riscaldamento: Gradi Giorno in Milano, periodo 2013-2020

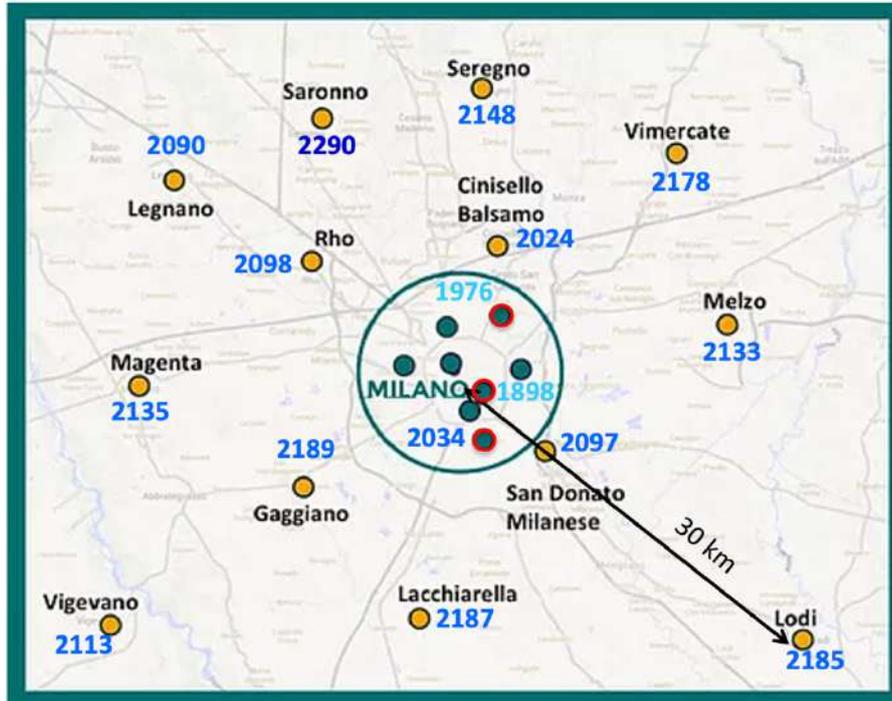


Figura 4.5 Gradi Giorno: valore medio nella stagione termica invernale, periodo 2013-2020 (progetto ClimaMi)

GRADI GIORNO ESTIVI (°C)

$$GGE_{yyyy} = \sum_{d=1}^N \left(\frac{\sum_{h=1}^{24} H_h}{24} - 25 \right)$$

dove:

- yyyy = anno
- N = numero di giorni dell'estate di yyyy
- H_h = Humidex dell'ora h
- 25 = temperatura di set point indoor (UNI 10339 e 10349)

→ > 0 se positivo
= 0 se negativo

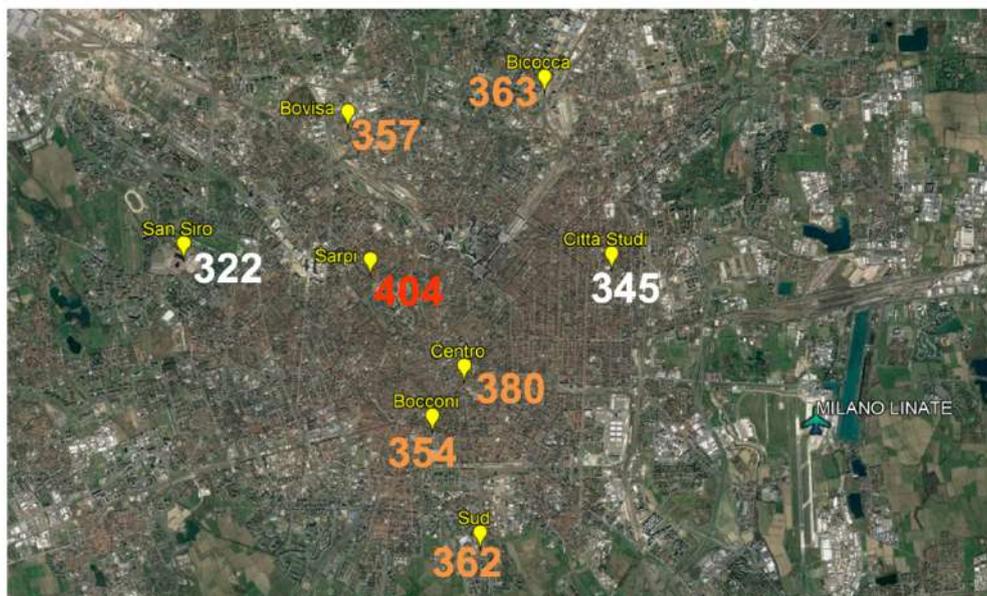


Figura 4.6 Indice di fabbisogno estivo di raffreddamento: Gradi Giorno Estivi, valore medio per stagione termica estiva

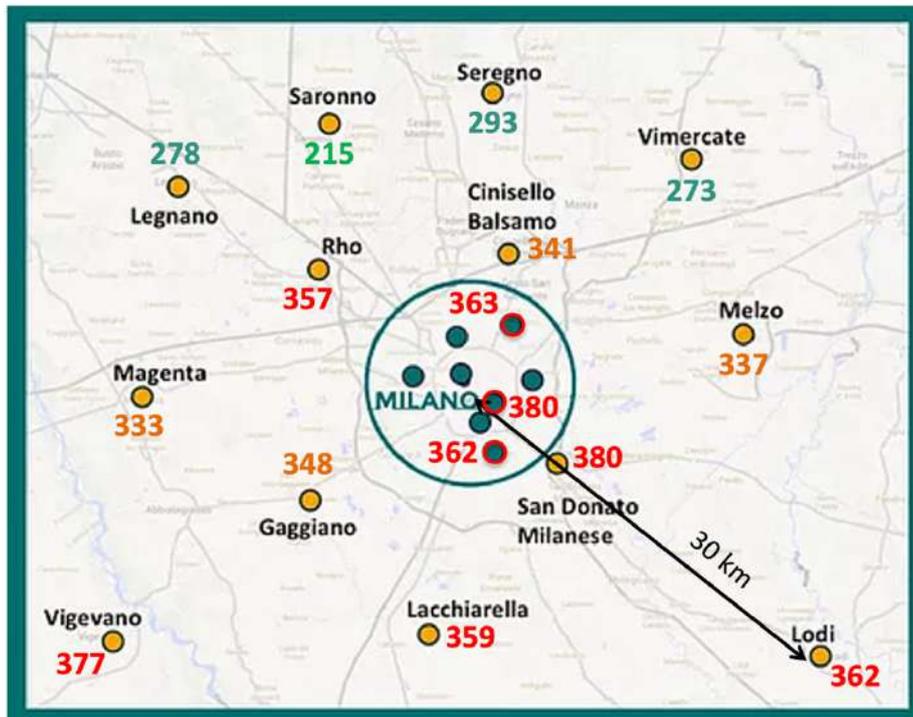


Figura 4.7 Gradi Giorno Estivi: valore medio per stagione termica estiva 2013-2020 (progetto ClimaMi)

Le Figure 4.4 e 4.5 riportano la definizione di Grado Giorno e ne mostrano le differenze del totale medio per stagione termica di riscaldamento in Milano e nei centri urbani dell'area progettuale di ClimaMi.

Né a livello di legislazione nazionale o regionale né a livello di norme tecniche è invece definito attualmente un analogo indicatore climatico per il fabbisogno energetico da condizionamento estivo, nonostante i consumi energetici - quasi prevalentemente elettrici - siano una voce significativa del bilancio energetico nazionale e risultino in continuo aumento. Per analogia con la stagione termica nazionale e come in uso nei paesi anglosassoni (*Cooling Degree Days*), si è introdotto il **Grado Giorno Estivo** (Figura 4.6). Poiché nei climi di tipo continentale marittimo e in particolare in Val Padana, il disagio termico e la necessità di condizionamento sono legati all'afa, ovvero non solo ai valori raggiunti dalla temperatura ma anche dai tassi di umidità dell'aria, si è formulato il Grado Giorno Estivo in funzione sia della temperatura che dell'umidità relativa dell'aria combinati in un indice empirico capace di quantificare la **percezione di caldo da parte dell'uomo**, l'**indice Humidex** (si veda par. 4.2.6). La diversa necessità di condizionamento estivo legata al microclima locale, quantificata tramite i Gradi Giorno Estivi, è mostrata in Figura 4.7.

In figura 4.8 è mostrata la relazione tra consumi energetici e Gradi Giorno a livello annuale nel comune di Melzo (MI)¹⁸.

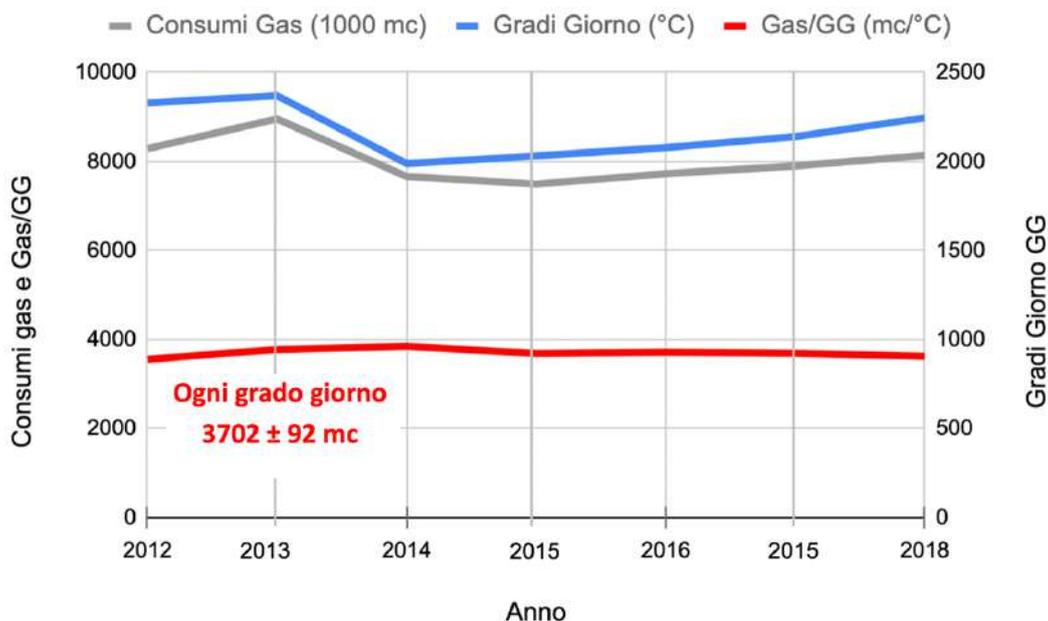


Figura 4.8 Relazione tra Consumi energetici da riscaldamento e Gradi Giorno a livello annuale a Melzo (MI)

(fonte: Prof. Ing. Franco Guzzetti, Politecnico di Milano Dipartimento ABC)

Parlando di **efficientamento energetico**, le attività che necessitano di dati climatici locali e aggiornati sono principalmente:

- le certificazioni energetiche;
- le diagnosi energetiche;
- le valutazioni di prestazioni energetiche (Indicatori di Prestazione Energetica IPE, Benchmark interni/esterni).

¹⁸ F. Guzzetti, "L'adattamento climatico e i consumi energetici" nel Corso di Capacity Building ClimaMi del 03/11/2020
<https://www.progettoclimami.it/webinar-foam-ott-nov2020>



Figura 4.9 Linee Guida Assoimmobiliare e ABI Energia

Nelle Linee Guida relative alla valutazione delle prestazioni energetiche del parco immobiliare si fa specifico riferimento ai dati climatici quali fattori significativi che possono influenzare i consumi energetici delle utenze. Tali dati vanno dunque misurati/reperiti per calcolare IPE e benchmark interni relativi ai consumi di quelli che vengono definiti Servizi Generali Climatizzazione.

[Enea dedica diverse Linee Guida all'efficienza energetica](#), tra cui quelle riportate in Figura 4.9 a titolo d'esempio.

Si segnalano in letteratura, tra i più frequenti indicatori di prestazione energetica impiegati per i consumi HVAC negli edifici, i seguenti:

$\text{IPE} = \frac{\text{consumo energetico}}{\text{m}^2}$	consumo di energia per unità di superficie (lorda, disperdente) climatizzata
$\text{IPE} = \frac{\text{consumo energetico}}{\text{m}^3}$	consumo di energia per unità di volume lordo climatizzato
$\text{IPE} = \frac{\text{consumo energetico}}{\text{Gradi Giorno}}$	consumo di energia da riscaldamento per unità di Grado Giorno
$\text{IPE} = \frac{\text{consumo energetico}}{\text{Gradi Giorno Estivi}}$	consumo di energia da raffrescamento per unità di Grado Giorno Estivo

Nei primi due casi, non si riesce a distinguere la quota di consumi energetici da ascrivere al sistema involucro-impianto (e a eventuali inefficienze strutturali e/o di conduzione) e quella determinata

dal clima specifico. Da cui, per tener conto sia di superficie/volumetria che del clima, una formulazione del seguente tipo risulta più completa e la Figura 4.8 risulta esplicativa in tal senso:

$$IPE = \frac{\text{consumo energetico}}{m^2 \times \text{Gradi Giorno}}$$

Per **gestione e monitoraggio del consumo energetico** ci si riferisce ad attività quali:

- i sistemi di gestione dell'energia
- i sistemi di monitoraggio distribuito di energia ed efficienza energetica

Nella norma tecnica europea del CEN "Energy measurement and monitoring plan for organisations - design and implementation" si definisce uno standard europeo e una metodologia per progettare, installare, implementare e gestire nel tempo un piano di monitoraggio non solo dell'energia ma anche dei **fattori che influenzano i consumi e le prestazioni energetiche** dell'organizzazione, tra cui i **parametri meteo-climatici**. Sono esplicitamente citati la temperatura e i gradi giorno.

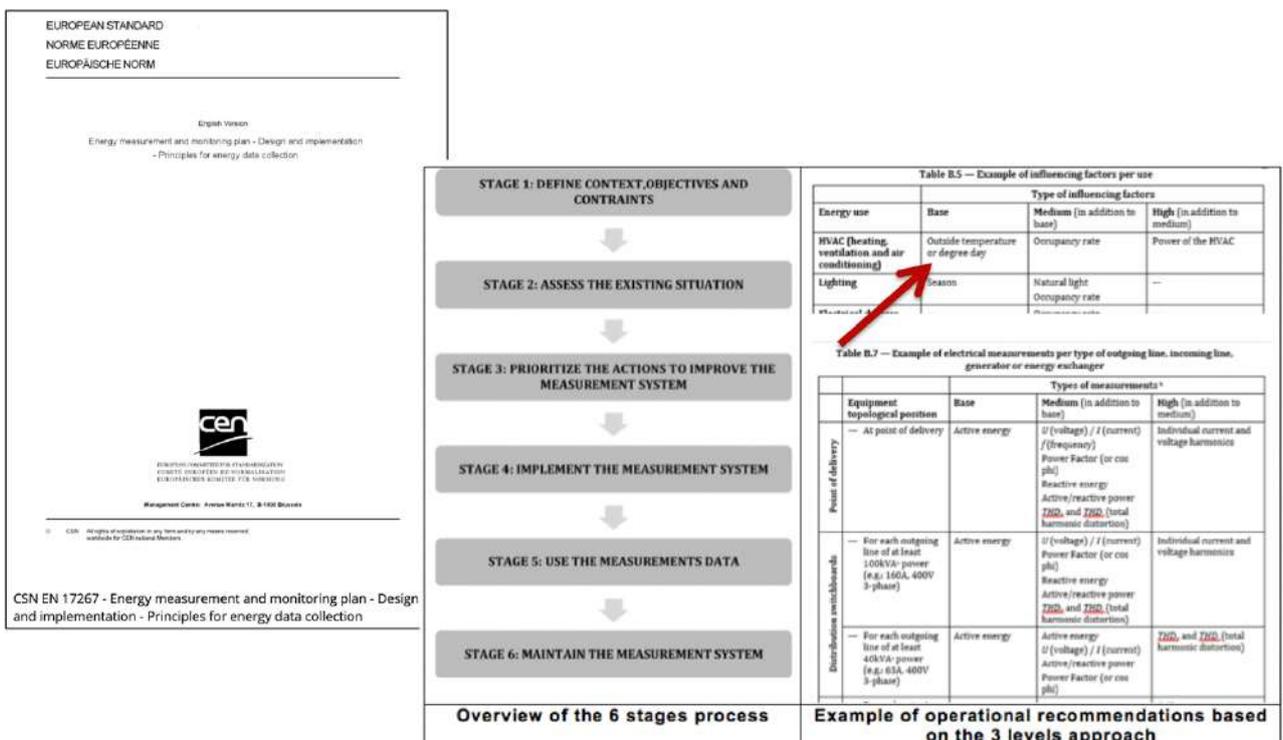


Fig. 4.10 Norma tecnica europea per la progettazione, la realizzazione e la gestione di un sistema di misura e monitoraggio dell'energia (CSN EN 1726)

4.2.3 Deflusso meteorico urbano

Le attività di progettazione e gestione del deflusso delle acque meteoriche in ambito urbano, in una logica di progettualità e di adattamento alla variazione del regime di piogge, necessitano di una conoscenza approfondita delle caratteristiche delle precipitazioni locali in termini di cumulato (o altezza), intensità, durate, frequenze e localizzazione spaziale (rif. Cap.3).

Dati dettagliati sugli afflussi flussi meteorici costituiscono infatti gli input di algoritmi progettuali e modellizzazioni idrauliche per la gestione delle acque meteoriche relativamente a:

- conduzione e potenziamento degli impianti di depurazione (vasche volano, sistemi di pompaggio e incremento delle sezioni di portata in uscita)
- progettazione di vasche di laminazione
- progettazione di infrastrutture verdi urbane, per accumulare temporaneamente e infiltrare acqua piovana nel suolo - le cosiddette **SuDS Sustainable Urban Drainage Systems** (a titolo esemplificativo viene riportato il progetto del Parco dell'Acqua a Paderno Dugnano - Fig. 4.11)
- utilizzo del reticolo idrico superficiale e sotterraneo
- regolamentazione dell'invarianza idraulica e idrologica
- progettazione di infrastrutture verdi urbane, per accumulare temporaneamente e infiltrare acqua piovana nel suolo



Figura 4.11 Parco dell'Acqua di Paderno Dugnano (MI)

La **progettazione** delle opere idrauliche avviene, infatti, **a partire dagli eventi meteorici** e sulla base di tempi di ritorno di progetto "standard" spesso indicati a norma di legge. Sempre più

frequentemente viene richiesta anche una valutazione del tipo «*cosa succede se l'opera progettata viene interessata da un evento con tempo di ritorno superiore a quello di progetto*»¹⁹ ovvero la **gestione del rischio idraulico**.

La caratterizzazione delle precipitazioni tramite indicatori climatici, necessaria per far fronte alle diverse esigenze progettuali e gestionali nel campo, non è univoca e le tradizionali ipotesi e definizioni relative agli apporti meteorici finora utilizzate nella modellazione idraulica e idrologica sono **in fase di ripensamento**: dalla **definizione di evento di pioggia** alla **distribuzione temporale delle piogge durante il singolo evento** e alla loro distribuzione areale rispetto al posizionamento del pluviometro.

Il tutto in funzione di tipologia e dimensione dell'opera idraulica e nel quadro di un clima non stazionario, ma in rapida evoluzione.

Tali informazioni sono importanti per il progettista idraulico, determinando la **scelta dello ietogramma** che dovrà rappresentare l'evento di pioggia più significativo per il dimensionamento progettuale.

L'analisi statistica dei dati di precipitazione a 10 minuti nella stazione di Milano Centro dal 1998 al 2018 ha restituito il seguente quadro della situazione:

- costanza delle precipitazioni in termini di quantitativi caduti a livello annuo
- variazione significativa nella distribuzione mensile delle precipitazioni
- riduzione del numero annuo di giorni di pioggia (≥ 1 mm), al tasso di 1 giorno in meno ogni 4 anni
- incremento dell'intensità di pioggia, al tasso di circa +1 mm/h ogni 6 anni (Figura 4.12)
- incrementi nelle durate dei fenomeni di precipitazione (quando piove, piove più a lungo) (Figura 4.13)
- incremento degli intervalli di tempo fra due eventi consecutivi (Figura 4.14)

¹⁹ S. Mambretti, "Dati climatici e pluviometrici per la progettazione delle opere idrauliche" Corso di Capacity Building ClimaMi del 13/11/19 <https://www.progettoclimami.it/formazione-2019-11-13>

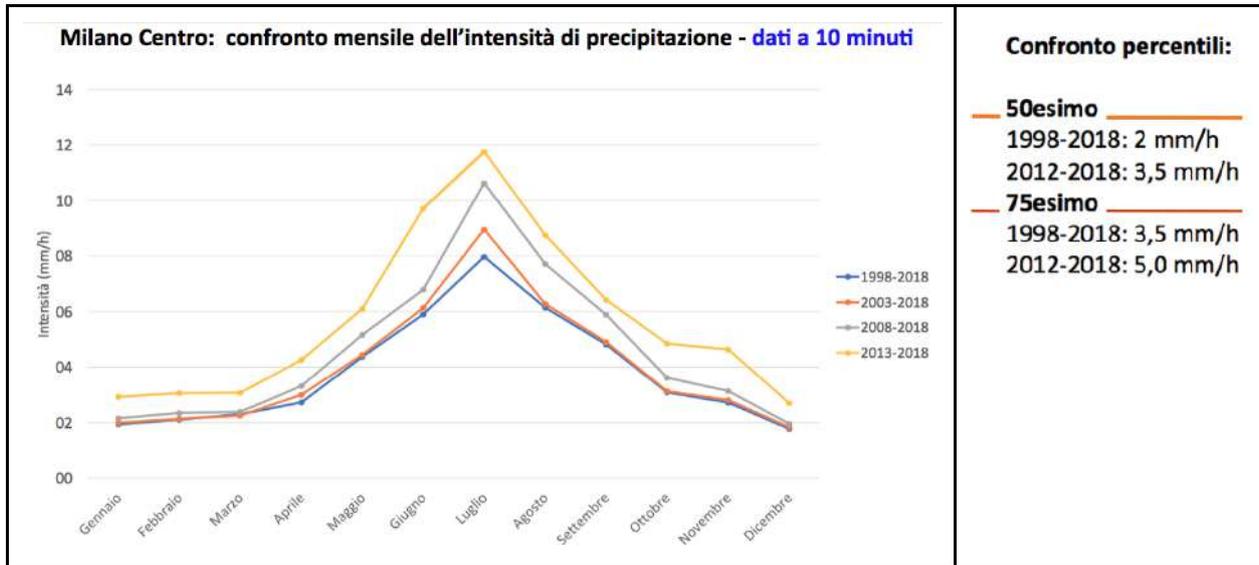


Figura 4.12 Incremento dell'intensità di pioggia, al tasso di circa +1 mm/h ogni 6 anni (Progetto ClimaMi)

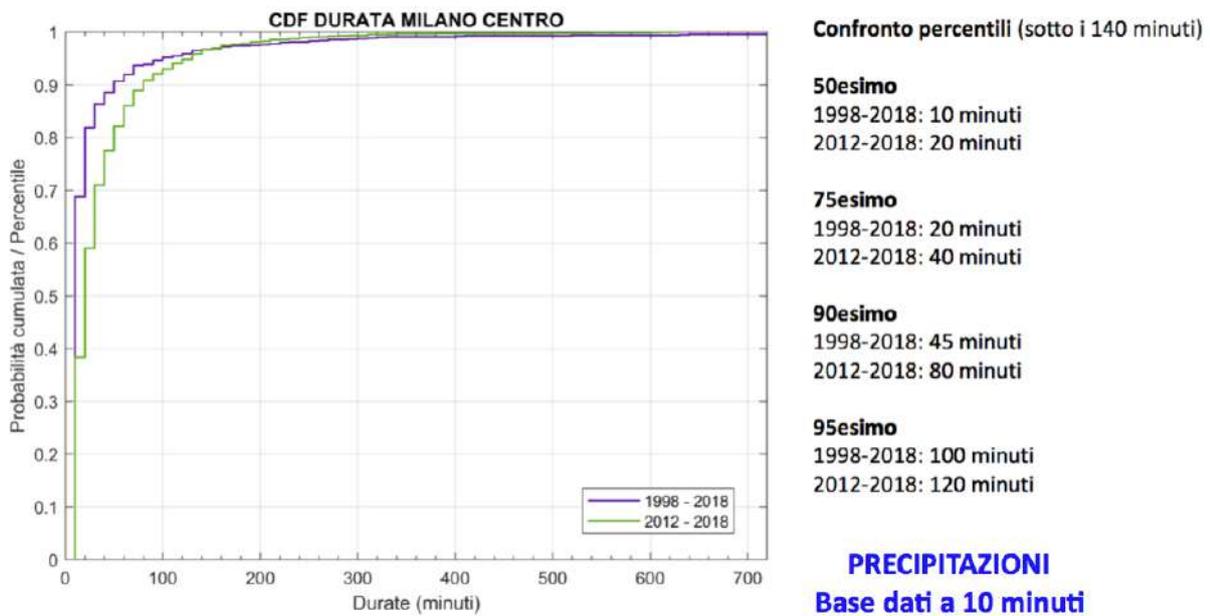


Figura 4.13 Curve di Frequenza CDF: incremento nelle durate dei fenomeni di precipitazione nell'ultimo decennio (Progetto ClimaMi)

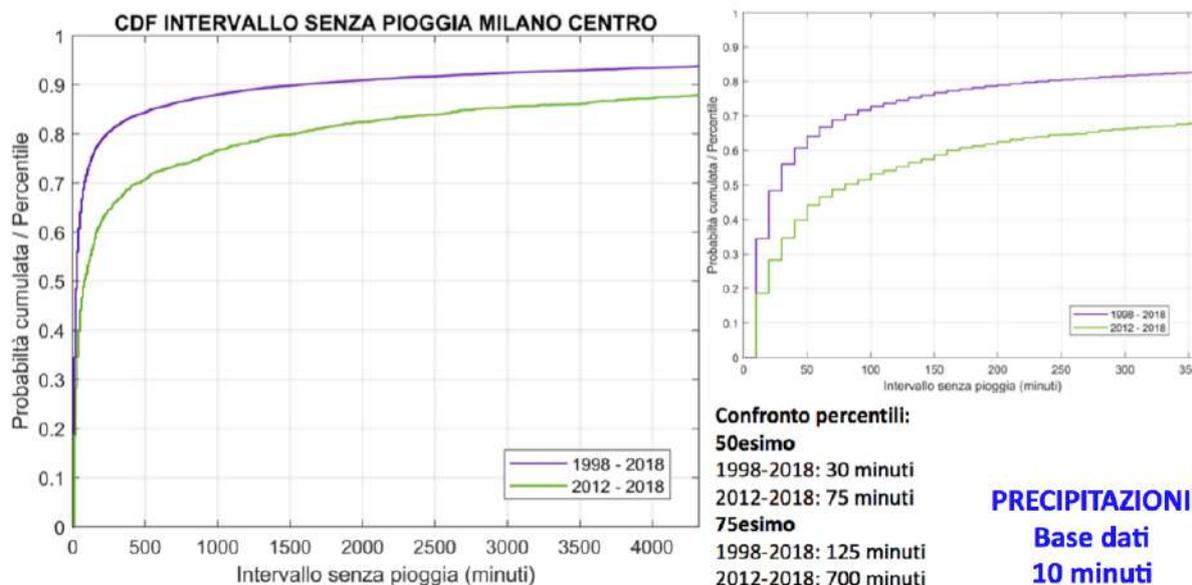


Figura 4.14 Curve di Frequenza CDF: incremento degli intervalli di tempo fra due eventi consecutivi nell'ultimo decennio (Progetto ClimaMi)

Le precipitazioni, a differenza delle altre variabili meteorologiche fondamentali, sono altamente variabili nello spazio e nel tempo, in particolare nelle stagioni tardo primaverile ed estiva in cui assumono carattere temporalesco (durate sub-orarie e dimensioni dell'ordine del km; rif. par. 3.3). Inoltre, i grandi centri urbani, caratterizzati da isole di calore rilevanti, influenzano le traiettorie delle celle temporalesche e la distribuzione spaziale delle precipitazioni entro la città stessa. Nel Catalogo delle Precipitazioni di ClimaMi (par. 5.4), oltre alle usuali statistiche sulle precipitazioni a base mensile, stagionale e annuale, sono presenti numerosi indicatori pluviometrici utili per la progettazione idraulica, tra cui:

- Intensità di precipitazione - media, mediana e massima assoluta
- Intensità di precipitazione media delle massime su eventi di 10 minuti
- Giorni di pioggia (≥ 1 mm) consecutivi medi e massimi
- Giorni senza pioggia (< 1 mm) consecutivi medi e massimi
- Distribuzione di frequenza dei giorni di pioggia consecutivi
- Episodi brevi (10 minuti) intensi (≥ 5 mm) – numero medio/anno (Fig. 4.15)
- Episodi semiorari intensi (≥ 15 mm) – numero medio/anno
- Episodi orari intensi (≥ 30 mm) – numero medio/anno
- Curve di probabilità pluviometrica per durate evento da 10 minuti a 24 ore (Fig. 4.16)

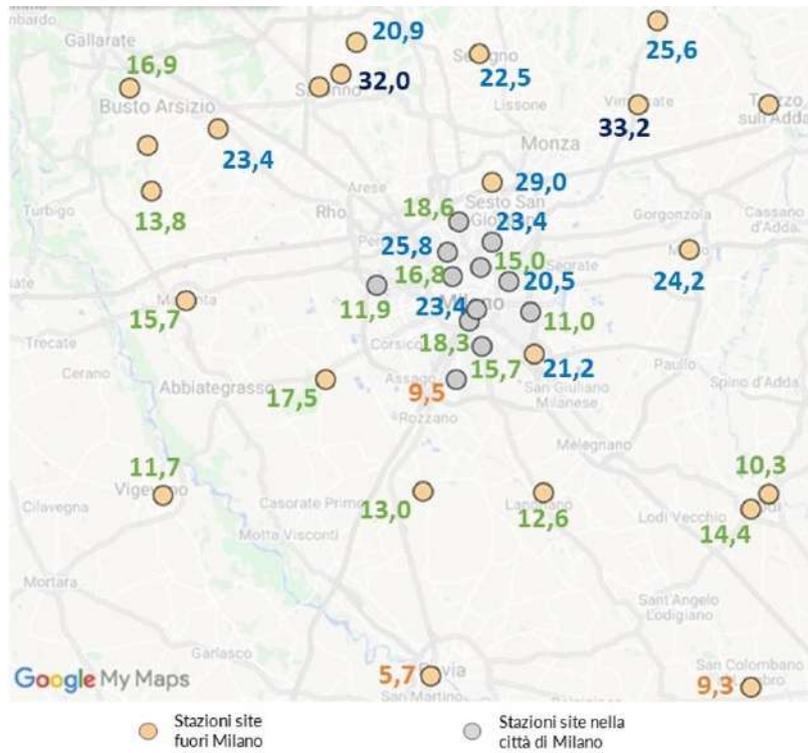


Figura 4.15 Rappresentazione su mappa dell'indicatore "Eventi con Precipitazioni ≥ 5 mm in 10 minuti (n° medio annuo)" (Catalogo delle Precipitazioni, progetto ClimaMi)

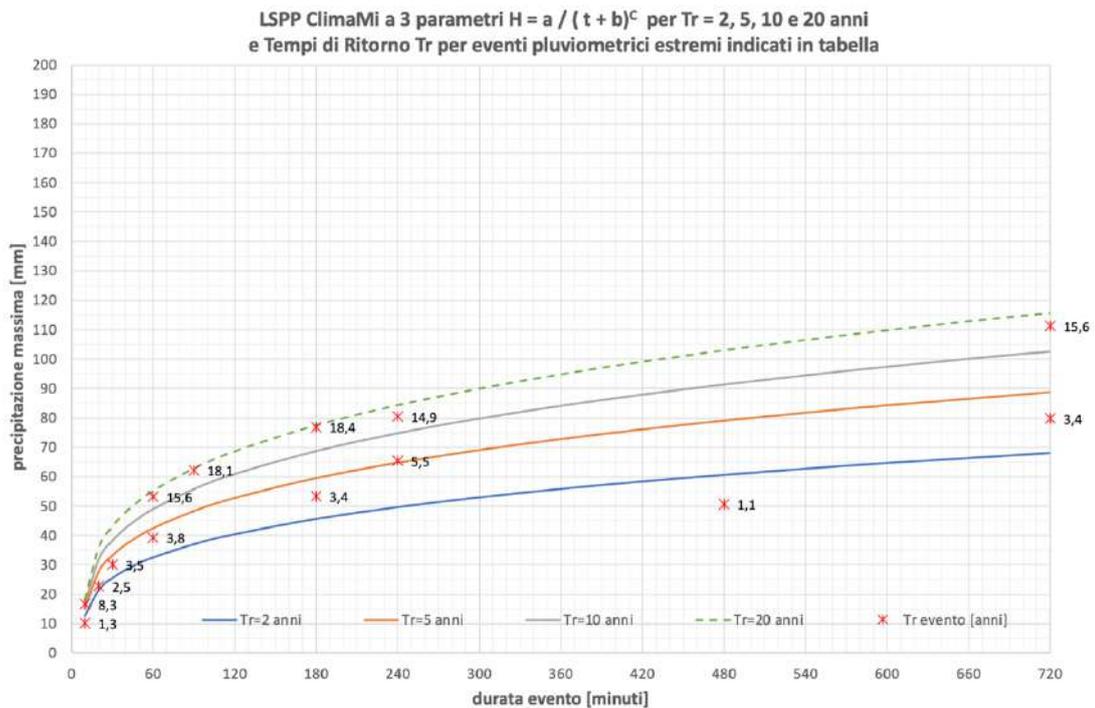


Figura 4.16 Linee Segnalatrici di Probabilità Pluviometrica LSPP a Legnano (MI) (Catalogo delle Precipitazioni, progetto ClimaMi)

4.2.4 Pianificazione territoriale

Le attività di pianificazione del territorio urbano in chiave di adattamento alla crisi climatica investono contemporaneamente molteplici fronti architettonici, ingegneristici e non solo: l'efficientamento energetico del parco edilizio, l'uso del suolo, la mobilità, le attività produttive, le infrastrutture, la qualità degli spazi pubblici, il benessere e la salute dei cittadini.

Sono direttamente interessati i vari strumenti di pianificazione territoriale degli enti locali, tra i quali:

- i **Piani Clima**
- i **Piani d'Azione per l'Energia Sostenibile e il Clima** (PAES e PAESC)
- i **Piani Territoriali Metropolitan e di Coordinamento Provinciali** (PTM, PTCP)
- i **Piani di Governo del Territorio** (PGT) - sia in fase di Valutazione Ambientale Strategica e Piano di Monitoraggio del PGT che di valutazione e scelta delle Varianti in rapporto ai fattori del clima e del microclima (decisioni di sviluppo urbanistico, di localizzazione degli insediamenti abitativi, produttivi, infrastrutturali verde pubblico incluso, che si ripercuotono sul sistema territoriale complessivo e sulla capacità dello stesso di rispondere all'emergenza climatica in corso)
- i **Piani Particolareggiati** - clima e microclima devono concorrere a definire la forma, i volumi, le tipologie e l'articolazione esterna dei manufatti edilizi e a progettare le aree pubbliche, gli spazi tra gli edifici, l'arredo stradale e la vegetazione urbana e periurbana nonché le connessioni urbano-rurale
- i **Regolamenti Edilizi** e requisiti cogenti (incentivi e criteri d'intervento per l'edificazione e per la scelta ottimale delle diverse tipologie di insediamenti anche in funzione del clima; il recupero, la trasformazione, la progettazione del verde e degli spazi pubblici; incentivi volumetrici)
- i **Piani del Verde**, capaci di disegnare spazi in grado di contrastare e moderare il disagio termoigrometrico dello spazio urbano e i sempre più frequenti fenomeni climatici estremi
- le **Relazioni di Invarianza Idraulica e Idrologica**, per la gestione integrata del deflusso delle acque meteoriche in ambito urbano ed extraurbano

Le scale spaziali implicate dalle varie attività di pianificazione urbanistica sono molteplici: dalla piazza al quartiere, da ambiti di rigenerazione e infrastrutture inter-quartiere all'intero territorio comunale e metropolitano/provinciale. L'informazione climatica necessaria per caratterizzare adeguatamente l'area di interesse varia conseguentemente con la scala spaziale e può fare riferimento a valori sito-riferiti degli indicatori climatici e/o a valori climatici medi areali in funzione dello scopo.

Tra gli indicatori climatici sito-riferiti particolarmente importanti ai fini dell'adattamento alla crisi climatica si sottolinea quello riferito alla **PERCEZIONE DEL CALORE (Indice Humidex, Par. 4.1.6) utilizzabile per quantificare la QUALITÀ MICROCLIMATICA DELLO SPAZIO URBANO PUBBLICO**, spazio esterno di cui è importante garantire la fruibilità in tutte le stagioni (Fig. 4.17).

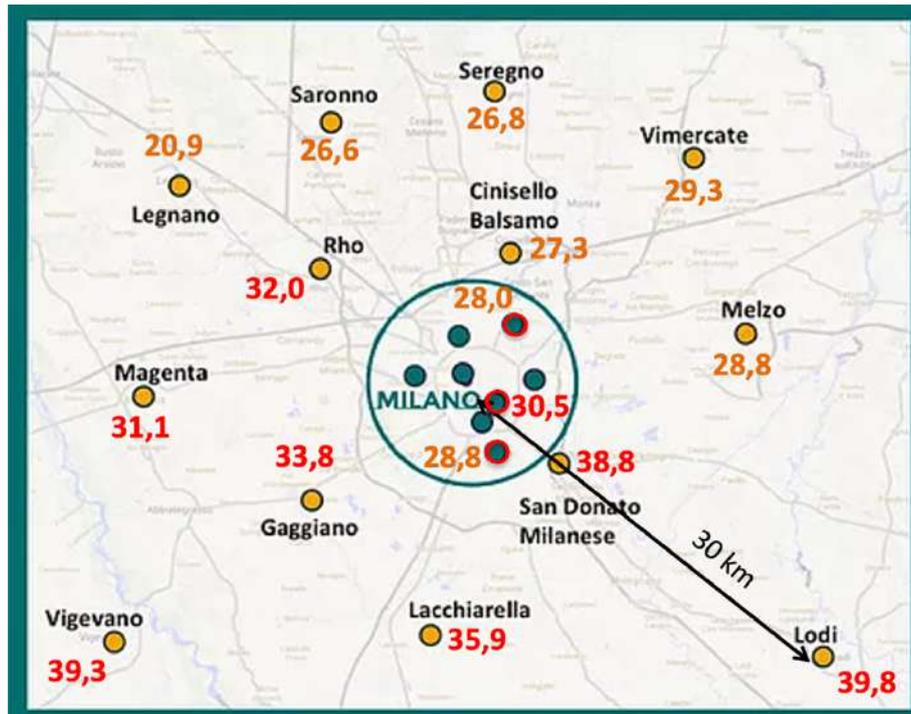


Figura 4.17 Disagio microclimatico: N° giorni/anno con almeno un valore orario di Humidex $\geq 35^{\circ}\text{C}$ nel 2013-2020
(Database ClimaMi)

Altri indicatori climatici sito-riferiti utili nella pianificazione urbanistica, elaborati e resi disponibili nel sito di progetto ClimaMi, sono:

- la **Rosa dei venti**, per quanto attiene alle localizzazioni residenziali, produttive e infrastrutturali;
- l'**Intensità e la frequenza degli eventi di precipitazioni forti e di breve durata**, per i conseguenti problemi di allagamento, disservizi e danni a infrastrutture, edifici pubblici e privati.

Si stanno sempre più configurando come essenziali, per la redazione e l'aggiornamento degli strumenti urbanistici e dei piani di settore, **indicatori climatici spazializzati sulle aree di interesse con passo di poche decine di metri in modo da poter caratterizzare dettagliatamente il tessuto urbano**. Tra questi risultano particolarmente utili²⁰ i valori mappati di temperatura dell'aria (Fig.

²⁰ Quaderni del Progetto ClimaMi, La componente climatica nell'aggiornamento del PGT del Comune di Melzo (MI), <https://www.progettoclimami.it/quaderni-delle-sperimentazioni>

4.18), in grado di localizzare e quantificare in termini di intensità e frequenze fenomeni climatici quali le isole di calore urbane ed eventi estremi meteorologici come le Ondate di Calore estive.

“La progettazione degli insediamenti all’interno di un piano regolatore generale o di un piano territoriale dovrà essere effettuata tenendo conto di tutti i fattori climatici e microclimatici presenti e, in seconda istanza, dovrà intervenire, quando si progettano per ciascuna zona i piani particolareggiati, sulla definizione dei volumi edilizi in rapporto al soleggiamento, al regime delle ombre e delle temperature esterne che vengono a crearsi per effetto del microclima, al regime dei venti, alla sistemazione delle aree verdi e della relativa vegetazione”²¹.

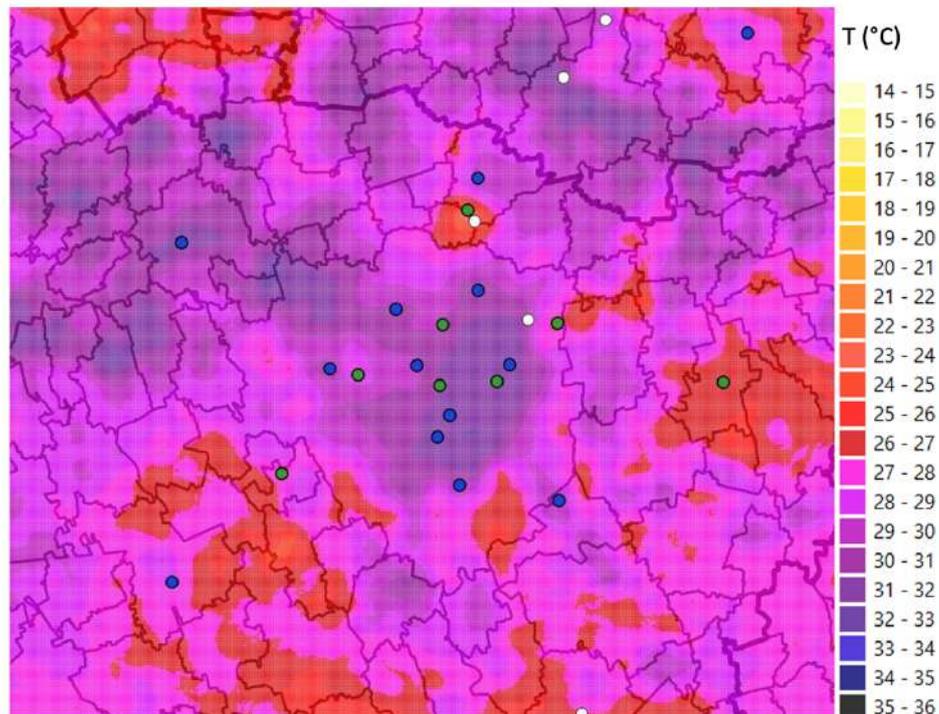


Figura 4.18 Distribuzione spaziale della temperatura dell'aria in un episodio di ondata di calore (31/07/2018) in presenza di isola di calore (Atlante Climatico delle Temperature dell'Aria, Progetto ClimaMi)

4.2.5 Gestione Verde urbano

L'utilizzo del verde nelle aree urbane non ha più solo un valore ornamentale ma è sempre più indirizzato al **contrasto degli impatti dell'urbanizzazione sul clima** (riduzione delle superfici impermeabili, aumento dell'ombreggiatura, mitigazione dell'isola di calore). Il clima urbano a sua

²¹ F. Musco, L. Fregolent "Pianificazione urbanistica e clima urbano - Manuale per la riduzione dei fenomeni di isola di calore urbano", 2014. http://www.iuav.it/Ateneo1/chi-siamo/pubblicazi1/freschi-di/musco_UHI_poligrafo.pdf

volta influenza in modo relevantissimo l'attività delle piante e la loro rigogliosità. **Solo piante ben curate e ben rifornite d'acqua possono esplicare effetti sul clima urbano.**

Si parla di verde urbano riferendosi a piante erbacee, arbustive e arboree al suolo e, talvolta, su tetti e facciate. Per ciascuna specie va verificata l'idoneità dell'ambiente atmosferico, a partire dalla sua selezione e, a seguire, piantumazione e mantenimento.

Nell'ultimo decennio sono state riscontrate varie problematiche dagli addetti al settore, collegate più o meno direttamente alla variazione del clima in corso:

- accorciamento del periodo utile per la piantumazione,
- fioriture multiple,
- anticipazione della stagione vegetativa,
- debolezza delle piante esposte ad attacchi parassitari in tutto l'arco dell'anno.

Da qui la richiesta di avere a disposizione **dati climatici** di temperatura, umidità dell'aria, precipitazioni, radiazione solare dettagliati **a livello decadale per la "ricostruzione" dei periodi utili alle varie fasi vegetative** (Figura 4.19) e **gestionali del verde, specie per specie**²².

In particolare, per tener conto degli effetti della temperatura, gli agronomi utilizzano le **Somme Termiche** anche dette Ore Normali di Caldo o **Curve di risposta alla temperatura** (Fig. 4.19).

²² L. Mariani, "Risorse e limitazioni climatiche per il verde ornamentale in città", "Milano, conoscenze e pratiche per l'adattamento climatico" - Corso ClimaMi del 7/11/2019 <https://www.progettoclimami.it/formazione-2019-11-07>

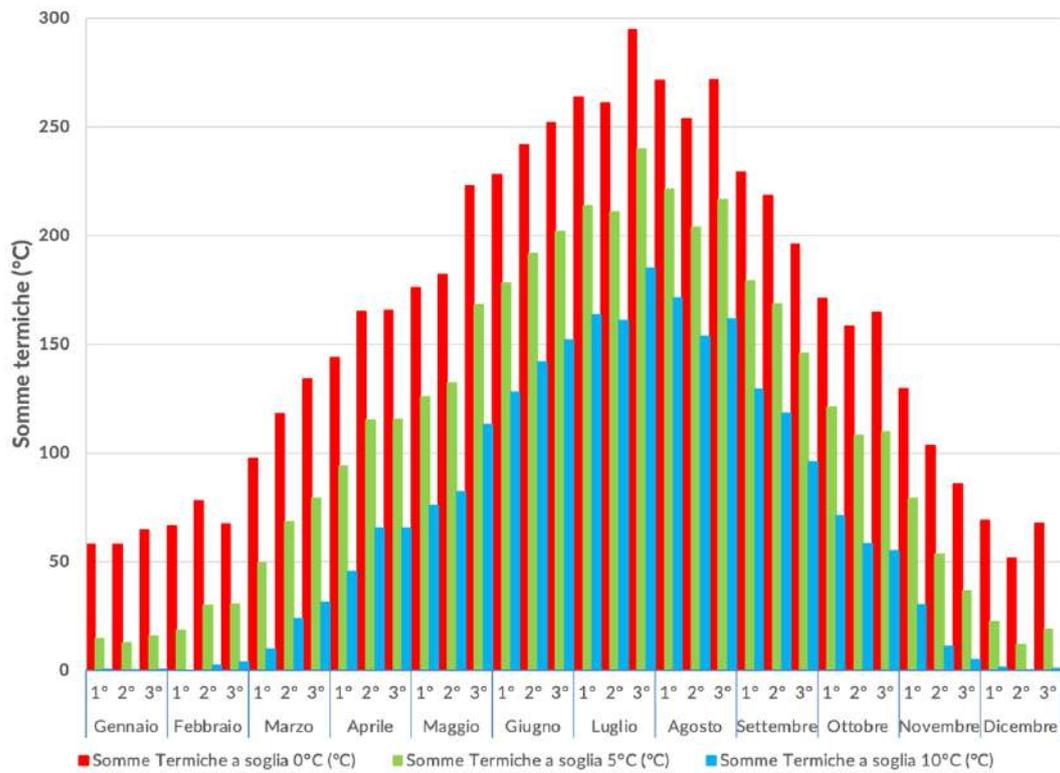


Figura 4.19 Somme Termiche decadali in Milano Centro, medie nel periodo 2013-2020
(Database ClimaMi)

Nel Database di ClimaMi sono presenti altri parametri utili a quantificare le risorse e le limitazioni idriche, termiche, radiative, anemologiche. Oltre alle usuali statistiche di valori medi ed estremi, sono quantificati i seguenti indicatori specifici:

- le **Somme termiche a soglia 0°C** (Fig. 4.19)
- le **Somme termiche a soglia 5°C** (Fig. 4.19)
- le **Somme termiche a soglia 10°C** (Fig. 4.19)
- le **Escursioni giornaliere di temperatura**
- le **Ondate di Calore**, in durata e intensità
- l'**Intensità di precipitazione**
- i **Giorni di gelo**
- i **Giorni di ghiaccio**
- le **Ore con Umidità relativa media < 10%**
- le **Ore con Umidità relativa media > 90%**
- gli **Eventi con raffica > 5 m/s** su 10 minuti
- gli **Eventi con raffica > 10 m/s** su 10 minuti

- gli **Eventi con raffica > 15 m/s** su 10 minuti
- gli **Eventi con raffica > 20 m/s** su 10 minuti
- la **Rosa dei venti**, con le classi di intensità per direzione di provenienza (Figg. 4.20 e 4.21)

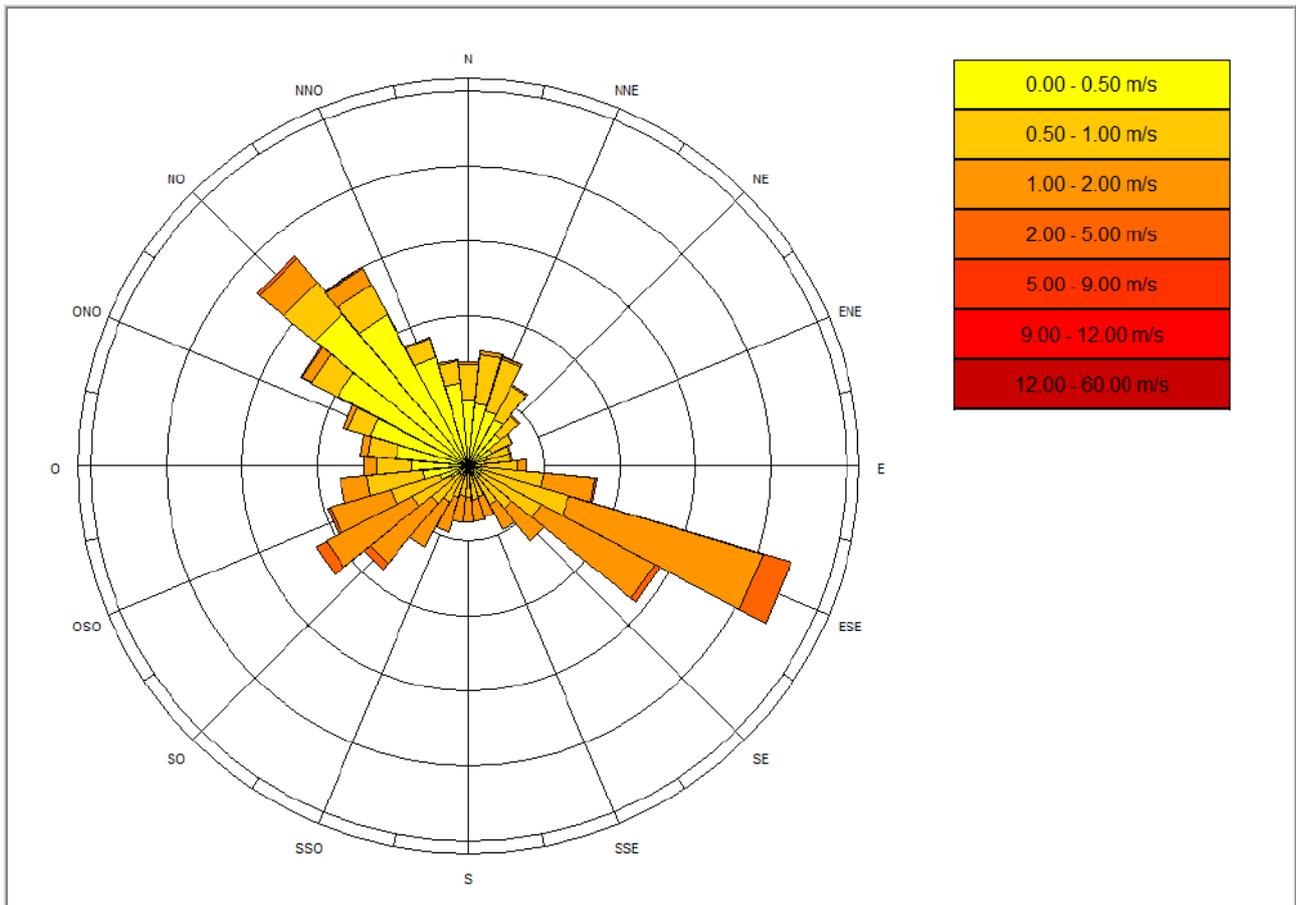


Figura 4.20 Rosa dei Venti nel mese di aprile a Vimercate (MB), medie nel periodo 2013-2020
(Database ClimaMi)

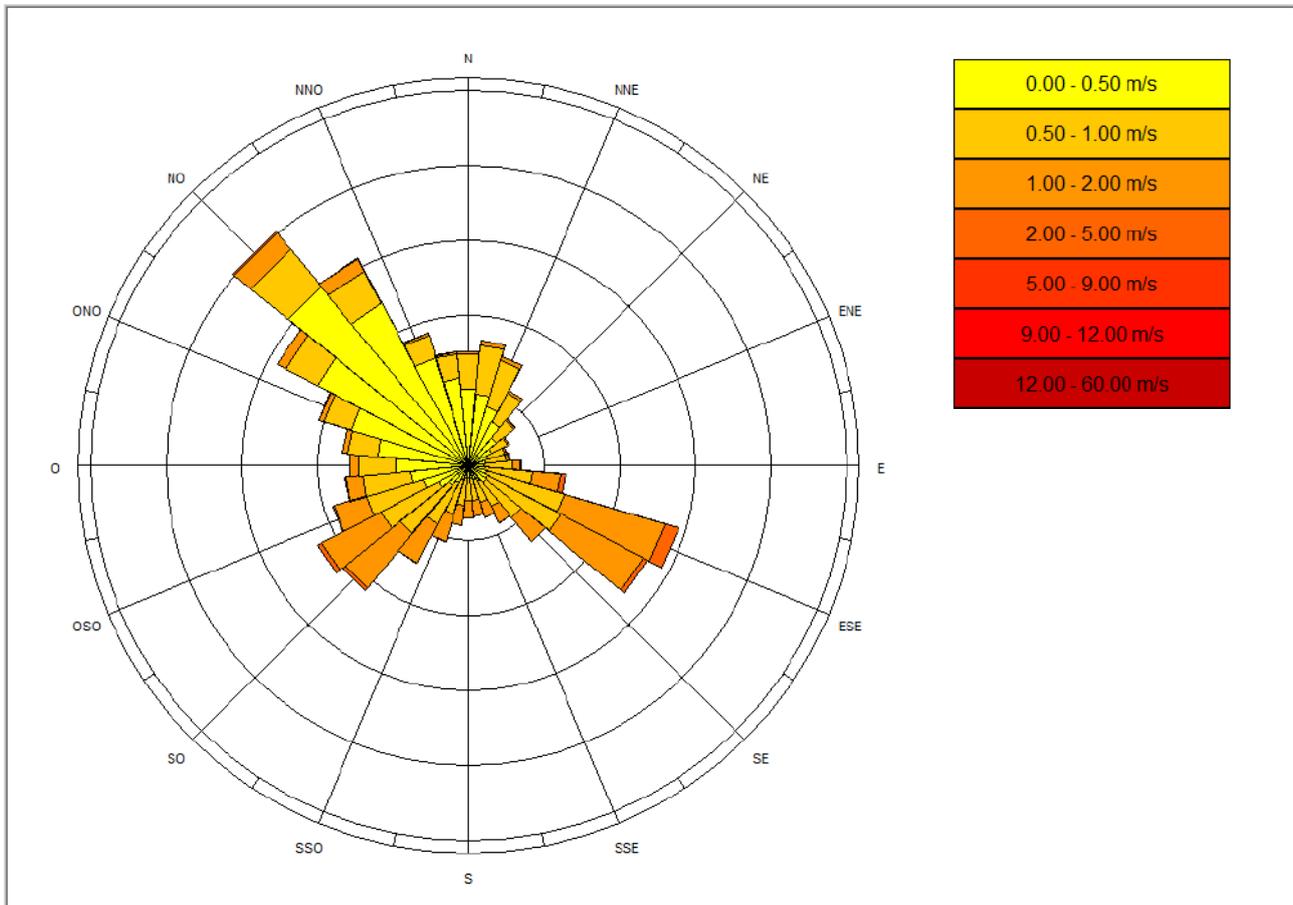


Figura 4.21 Rosa dei Venti a Vimercate (MB), medie nel periodo 2012-2020

(Database ClimaMi)

4.2.6 Il benessere termoigrometrico e la salute pubblica

Il “caldo” percepito dal corpo umano è un fenomeno complesso che risulta dall’interazione tra la radiazione solare, la temperatura, l’umidità atmosferica e la ventilazione.

Periodi di caldo estremo possono avere serie conseguenze sulla salute umana, in particolare sulla popolazione sensibile (anziani e bambini in età prescolare) e su quella malata. Inoltre condizioni di caldo intenso e prolungato possono incidere anche su varie attività umane all’aperto e in ambienti confinati, causando danni e perdite in termini di infrastrutture e servizi ecosistemici.

A tali periodi ci si riferisce con il termine di “Ondate di Calore”. L’Organizzazione Mondiale della Meteorologia (WMO) e l’Organizzazione Mondiale della Salute (WHO) congiuntamente definiscono l’**Ondata di Calore** come un evento in cui le temperature estreme giornaliere diurna e notturna sono superiori a determinate soglie locali (corrispondenti al 95° percentile delle temperature rispettivamente massime diurne e minime notturne in periodo estivo) e l’evento perdura per 2 o

più giorni²³. Le soglie di temperatura estrema diurna e notturna vanno quindi calcolate per ogni località d'interesse su un periodo climatico di riferimento trentennale (WMO CLINO, possibilmente del trentennio precedente a quello del periodo da valutare; si veda par. 3.1).

Nel Database di ClimaMi sono disponibili vari indicatori che caratterizzano le **Ondate di Calore** in termini di **intensità, durata, frequenza** medie e massime. Una mappatura dell'occorrenza media delle Ondate di Calore nell'ultimo decennio è mostrata in Figura 4.22.

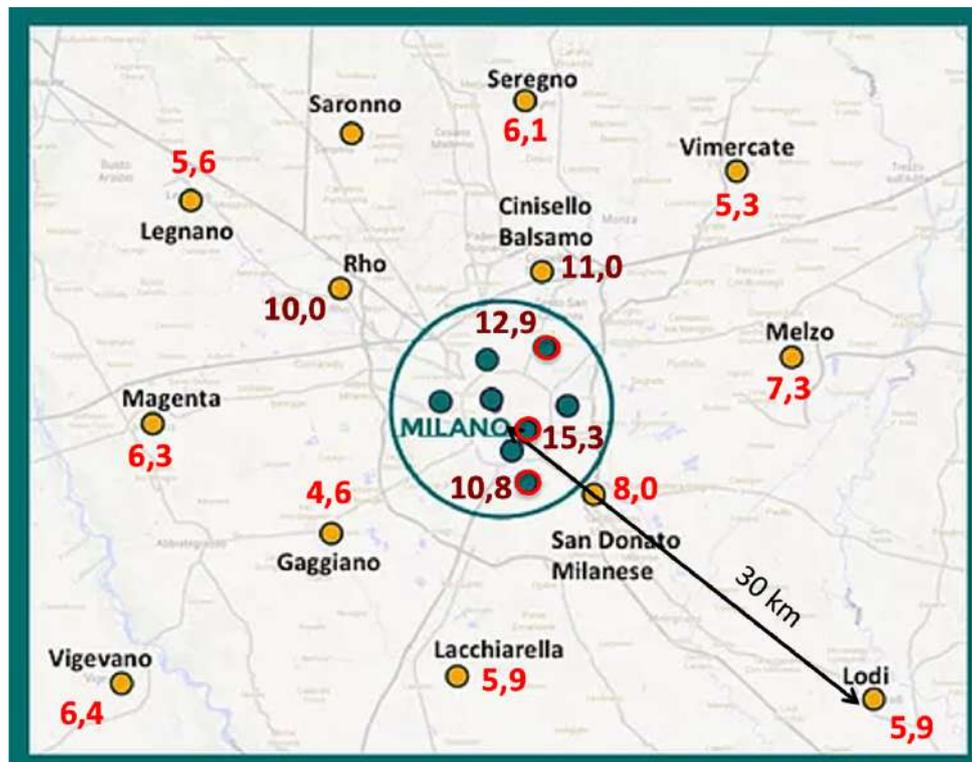


Figura 4.22 Ondate di Calore: N° medio di giorni/anno nel 2013-2020 (soglie CLINO 1961-1990 di Milano Centro)
(Database ClimaMi)

Alle Ondate di Calore si aggiungono indicatori che caratterizzano gli eventi estremi di calore con riferimento al solo periodo diurno o notturno, quali i **Giorni di Calura** (giorno con temperatura massima > 30°C) e le **Notti Tropicali** (giorno con temperatura minima > 20°C):

- Giorni di Calura - N° medio
- Giorni di Calura consecutivi - N° medio/massimo assoluto/distribuzione di frequenza media
- Notti Tropicali - N° medio

²³ WMO, WHO "Heatwaves and health: guidance on warning-system development", 2015.
<https://public.wmo.int/en/resources/library/heatwaves-and-health-guidance-warning-system-development>

- Notti Tropicali consecutive - N° medio/massimo assoluto (Fig. 4.23) e distribuzione di frequenza media
- **Giorni di Calura con Notti Tropicali** ($T_{max} > 30^{\circ}\text{C}$ e $T_{min} > 20^{\circ}\text{C}$) - N° medio
- Giorni di Calura con Notti Tropicali consecutivi - N° medio/massimo assoluto/distribuzione di frequenza media

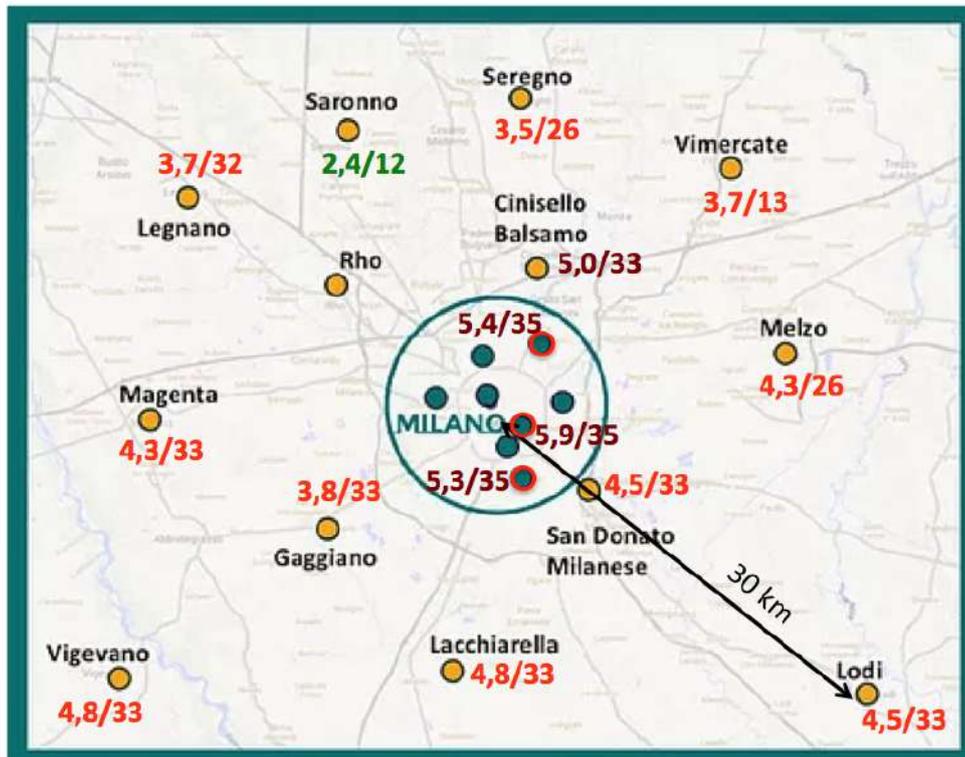


Figura 4.23 Notti Tropicali consecutive: N. medio/max assoluto in estate nel periodo 2013-2020
(Database ClimaMi)

Nei climi estivi afosi, come quello della Pianura Padana, **la percezione di caldo non è legata solo ai valori di temperatura ma anche ai concomitanti tassi di umidità dell'aria**. Poiché la temperatura dell'aria da sola non è dunque un buon indicatore dell'ambiente termico sperimentato dall'uomo, sono stati messi a punto vari indicatori biometeorologici sperimentali che descrivono le complesse condizioni di scambio di calore tra il corpo umano e l'ambiente termico circostante in funzione di due o più variabili meteorologiche [WMO WHO, 2015]. Nel progetto ClimaMi si è utilizzato l'**Indice HUMIDEX** che descrive l'effetto termico percepito dall'uomo in funzione della combinazione di temperatura e umidità dell'aria (Figura 4.24).

HUMIDEX:
disagio ed
effetti sanitari

$$H = T + \frac{5}{9} \left(6,11 \frac{UR}{100} 10^{\frac{7,5T}{237,7+T}} - 10 \right)$$

unità di misura in °C
va calcolato a livello orario

Alti tassi di umidità relativa ostacolano il raffreddamento cutaneo per evaporazione e, accoppiati a temperature elevate, possono essere fonte di disagio per l'organismo.

Al di sotto di 29		Poche persone percepiscono disagio.																	
Da 30 a 34		Sensazione di malessere più o meno significativa.																	
Da 35 a 39		Sensazione di malessere abbastanza intensa. Prudenza. Limitare alcune attività fisiche gravose.																	
a 40 a 45		Sensazione di malessere generalizzato. Pericolo. Evitare gli sforzi.																	
Da 46 a 53		Grave pericolo. Sospendere le attività fisiche.																	
Al di sopra di 54		Colpo di calore imminente (pericolo di morte)																	
Temperatura (°C)	Umidità relativa (%)																		
	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100		
21	21	21	21	21	21	22	22	23	24	24	25	26	26	27	28	28	29		
22	22	22	22	22	22	23	24	25	25	26	27	27	28	29	29	30	31		
23	23	23	23	24	24	25	26	27	28	28	29	30	31	31	32	33	33		
24	24	24	24	25	26	27	28	28	29	30	31	32	33	34	35	35	36		
25	25	25	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39		
26	26	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41		
27	27	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42		
28	28	28	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	42	43	44	45		
29	29	30	31	32	33	35	36	37	38	39	40	41	43	44	45	46	47		
30	30	31	32	34	35	36	37	39	40	41	42	43	45	46	47	48	49		
31	31	33	34	35	37	38	39	40	42	43	44	46	47	48	49	50	51		
32	32	34	35	37	38	40	41	42	44	45	46	48	49	50	51	52	53		
33	33	36	37	38	40	41	43	44	46	47	48	50	51	52	54	55	56		
34	34	37	39	40	42	43	45	46	47	49	50	52	53	55	56	57	58		
35	35	39	40	42	43	45	46	48	49	51	53	54	56	57	58	59	60		
36	37	40	42	43	45	47	48	50	51	53	55	56	58	59	61	62	63		
37	38	42	43	45	47	49	50	52	54	55	57	58	61	63	64	65	66		
38	40	43	45	47	49	50	52	54	56	57	59	62	63	65	67	68	69		
39	41	45	47	49	51	52	54	56	58	59	62	64	66	68	70	72	73		
40	43	47	49	51	52	54	56	58	61	63	65	67	69	71	73	75	76		
41	45	48	50	52	54	56	58	61	63	65	68	70	72	74	76	78	79		
42	46	48	50	52	54	56	58	61	64	66	68	70	73	75	77	79	82		

Figura 4.24 Indice Humidex: formula, tabella dei valori T-UR ed effetti di disagio termico

Sono state considerate due soglie:

- **Humidex ≥ 35°C** - *N° medio ore/giorni*, a indicare condizioni di disagio termoigrometrico e utile per quantificare la qualità microclimatica dello spazio esterno pubblico (Figura 4.24);
- **Humidex ≥ 40°C** - *N° medio ore/giorni*, a indicare condizioni di possibile pericolo per la salute umana; al superamento di tale soglia, il servizio sanitario canadese²⁴ attiva il protocollo di allerta e protezione della popolazione dalle ondate di calore.

²⁴ L'Indice Humidex è stato messo a punto dal Servizio Meteorologico e dal Servizio Sanitario Canadese e testato nella Regione dei laghi che presenta un intervallo di valori di temperatura e umidità dell'aria applicabili anche in gran parte del nostro paese.

4.3 Rappresentatività spazio-temporale degli indicatori climatici

L'ambiente urbano va pensato come una "collezione di milioni di microclimi": le variazioni orizzontali e verticali di tutte le variabili climatiche sono significative e fortemente influenzate dalle caratteristiche geometriche, strutturali e funzionali del tessuto urbano (Figura 4.25).

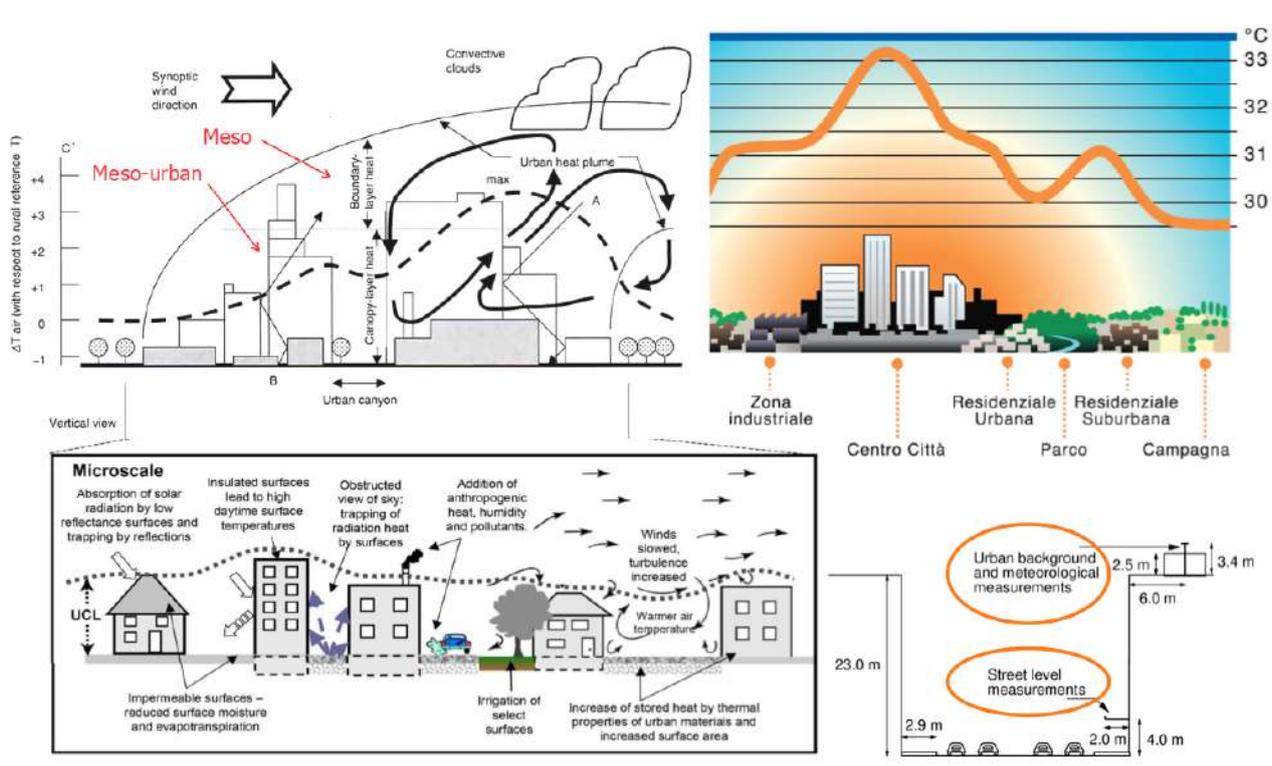


Figura 4.25 Modello concettuale dell'atmosfera urbana (EPA, <https://www.epa.gov/heat-islands/heat-island-compendium>)

Ogni stazione meteorologica restituisce un valore puntuale delle variabili atmosferiche ossia riferito al sito di misura. Il posizionamento della stazione al suolo piuttosto che al di sopra dei tetti incide sulla possibilità di estrapolarne i valori alle aree immediatamente circostanti: se al suolo, basta spostarsi di qualche metro e la temperatura, ad esempio, può variare bruscamente di qualche grado. Anche la localizzazione interno/esterno della città (stazione urbana/stazione rurale o aeroportuale) e internamente allo stesso tessuto urbano (area periurbana industriale o residenziale, parco, centro cittadino) è tanto più influenzante quanto più è estesa la città.

Le stazioni meteo urbane utilizzate nel progetto ClimaMi sono opportunamente posizionate al limite superiore dello *Urban Canopy Layer* UCL, ovvero appena al di sopra del livello tetti e in corrispondenza dell'inviluppo "ideale" della città. Fotografano quindi una sorta di media risultante di tutto ciò che avviene al di sotto di esse, all'interno dell'UCL e gli **indicatori climatici di ClimaMi**

possono essere considerati **rappresentativi entro un raggio di qualche centinaio di metri**. Per ogni stazione sono forniti i Metadata (par. 5.2.3), che permettono di contestualizzare la stazione meteo rispetto alle caratteristiche del sito di misura e di estendere la sua rappresentatività ad una più ampia area circostante o addirittura a contesti urbani simili (di particolare interesse in questo senso il parametro LCZ *Local Climate Zone* – Cap. 3). In generale, i criteri da seguire nella scelta di una stazione meteo e dei relativi dati per un sito d'interesse, diverso da quello di misura, sono esemplificati in Figura 4.26.

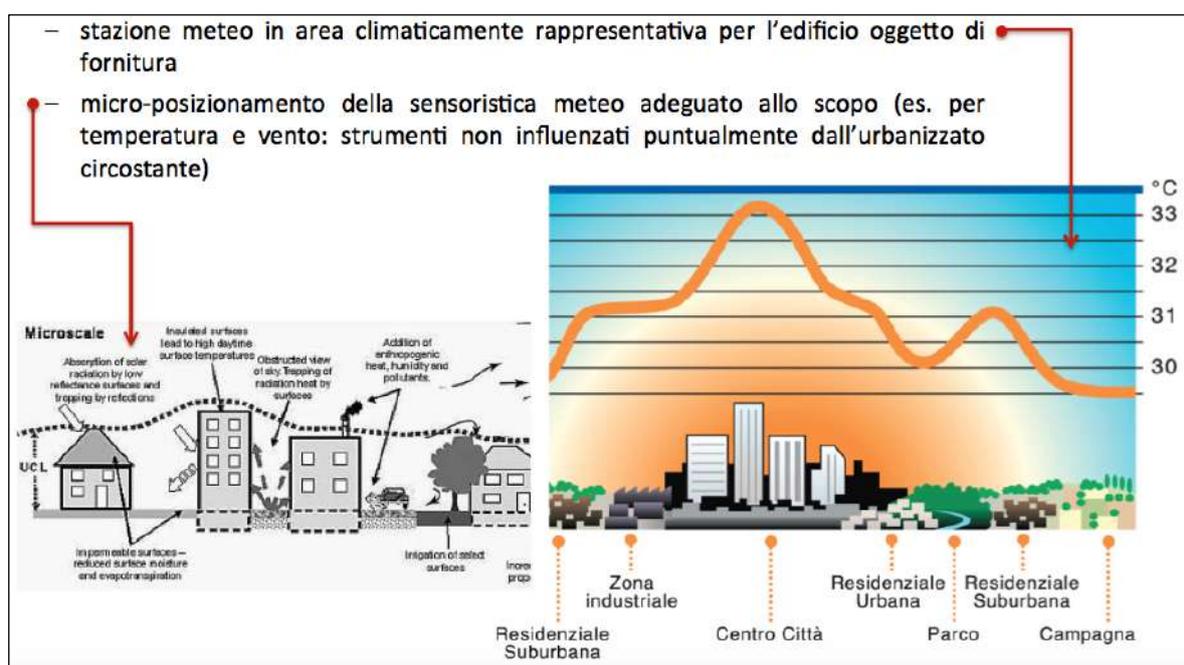


Figura 4.26 Criteri per la scelta della stazione meteorologica di cui utilizzare i dati

Per esemplificare, l'utilizzo dei dati di temperatura di Milano Linate (stazione extraurbana fino a qualche decennio fa, ormai di tipo suburbana) possono differire di qualche unità di grado sulle medie annue o stagionali e sfiorare la decina di gradi se si considerano le massime assolute. Differenze significative sussistono in tal senso per il conteggio dei gradi giorno e per le temperature di progetto estive e invernali.

I dati climatici di una stessa località possono differire tra loro, oltre che per l'ubicazione della stazione di misura, anche per il periodo temporale rispetto al quale è definito il clima ovvero rispetto al quale si effettuano le valutazioni statistiche per il calcolo degli indicatori climatici. In funzione dello scopo, della variabile climatologica e delle variazioni cui è soggetta occorre scegliere il periodo climatico più opportuno (rif. par. 3.1). La Tabella 4.1 che segue mostra un caso esemplificativo:

Tabella 4.1 Temperature medie annue ed estreme estive in Milano Centro per diversi CLINO

CLINO	T media (°C)	ESTATE (Giu - Ago)	
		MIN giornaliera *	MAX giornaliera*
1961-1990 	13,7	23,2 	33,1 
1971-2000 	13,9	23,3	33,6
1981-2010 	14,3	24,1	34,7

* 95° percentile: solo 5% dei valori nelle estati del trentennio superiore a tale valore

In generale, qualsiasi sia lo scopo applicativo, occorrono **dati climatici le cui incertezze, scala spaziale, scala temporale siano adeguate e coerenti con quelle degli altri dati di input e con l'output che ci si prefigge di ottenere.**



5. SI-CU – STRUMENTO INFORMATIVO CLIMA URBANO:

**il Database Climatologico
l'Atlante delle Temperature dell'Aria
il Catalogo delle Precipitazioni**

5.1. Lo Strumento Informativo Clima Urbano SI-CU

Lo Strumento Informativo Clima Urbano SI-CU è una **raccolta di informazioni quantitative sul clima delle aree urbane**, incluse nel dominio del progetto ClimaMi, e si riferisce in gran parte all'ultimo decennio. È stato specificatamente ideato ed elaborato per l'**utilizzo operativo nelle varie attività di pianificazione, progettazione e gestione in ambiente urbano**, fornendo **supporto alle decisioni e dati di input ad algoritmi e modelli progettuali**.

Il SI-CU si compone di:

- il **Database Climatologico**, una banca dati climatici interrogabile per variabile climatica, sito di misura (stazione meteorologica), dettaglio temporale e settore applicativo (par. 5.2);
- l'**Atlante Climatico della Temperatura dell'Aria**, una raccolta di mappe di temperatura ad alta risoluzione spaziale dedicate al fenomeno dell'Isola di Calore Urbana invernale ed estiva e agli eventi estremi di caldo rappresentati dalle Ondate di Calore; restituisce mappe vettoriali ed è consultabile online con funzioni di visualizzazione e sovrapposizione di layer tematici tipo GIS (par. 5.3);
- il **Catalogo delle Precipitazioni**, una banca dati riservata alla caratterizzazione spaziale e temporale dell'attuale regime delle precipitazioni con particolare attenzione agli eventi pluviometrici estremi, alle piogge intense di durata sub-oraria, alla variazione spaziale della statistica descrittiva delle precipitazioni nella città di Milano e nell'intero dominio progettuale; include le curve di probabilità pluviometrica e il calcolo dei tempi di ritorno per eventi di durata sub-oraria (par. 5.4);
- le presenti **Linee Guida** applicative, procedurali e di orientamento sul significato e sull'utilizzo di dati e indicatori climatici nei vari settori applicativi, mirante tra l'altro a unificare i lessici tecnici di settore relativamente alla tematica clima;
- l'**Addendum alle Linee Guida**, una raccolta di riflessioni di stakeholder del progetto ClimaMi sull'uso applicativo dei dati climatici e di dialoghi tra clima, ambiente e architettura;
- i **Quaderni delle sperimentazioni**, che raccontano i casi pilota di interventi progettuali e di pianificazione territoriale che hanno usufruito operativamente degli strumenti del SI-CU:
 - l'Aggiornamento del PGT di Melzo (MI)
 - il Progetto di Rigenerazione dell'area ex-Necchi di Pavia
 - gli interventi di Urbanistica Tattica in alcune piazze di Milano
 - la progettazione di un'opera drenaggio delle acque meteoriche a Canegrate (MI)

In Appendice D è riportata la descrizione dell'impianto procedurale e degli algoritmi di calcolo dello Strumento Informativo Clima Urbano.

Tutti i contenuti sono accessibili come open data sotto licenza Creative Commons Attribuzione 4.0 Internazionale (CC BY-4.0).

5.2. Il Database Climatologico

Puntando per quanto possibile alla completezza delle informazioni climatiche a supporto delle attività pro adattamento ai CC nei diversi settori applicativi, il Database ClimaMi include **92 indicatori climatici afferenti alle problematicità climatiche del territorio urbano e al periodo 2013-2020**.

Tali indicatori sono stati individuati e selezionati dal gruppo di lavoro multidisciplinare del progetto ClimaMi includente climatologi, architetti, ingegneri, urbanisti, agronomi e avvallati dai numerosi stakeholder pubblici e privati del progetto.

Nel complesso, tali indicatori forniscono l'**attuale quadro climatologico del bacino aerologico milanese, specializzato per l'ambito urbano**.

La metodologia sviluppata risulta inoltre facilmente esportabile in altri contesti urbani e metropolitani.

Il Database risulta interrogabile, per passi successivi (Fig. 5.1), rispetto a:

- ⇒ settore di attività,
- ⇒ stazione meteo,
- ⇒ variabile climatica,
- ⇒ dettaglio temporale

in modo da facilitare la navigazione nella banca dati ed eventualmente

fornire un supporto nella selezione degli indicatori.

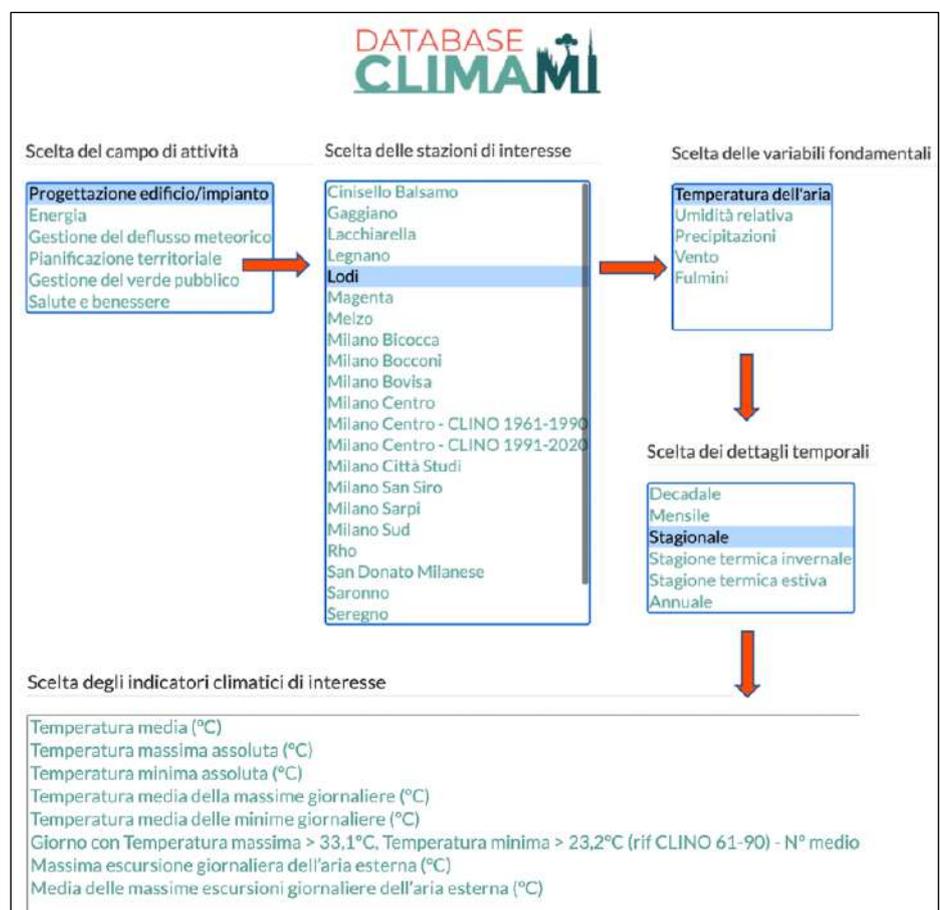


Figura 5.1 Database ClimaMi: schermate di interrogazione e selezione indicatori

Ad eccezione del Campo di Attività, per il quale è possibile la selezione di un'unica tipologia di attività, in tutti gli altri casi (stazioni, variabili fondamentali, dettagli temporali e indicatori climatici) sono fattibili selezioni multiple.

5.2.1 Gli indicatori climatici

Gli indicatori climatici sono parametri statistici derivanti da una o più variabili meteorologiche fondamentali, il cui scopo è descrivere gli aspetti climatologici di una certa zona. I dati meteo da cui sono ricavati devono avere determinati requisiti riassumibili nei seguenti termini²⁵:

- alta qualità, intesa come accuratezza e riferibilità agli standard;
- continuità temporale, intesa come percentuale (elevata) di effettiva disponibilità;
- confrontabilità, che dipende da strumentazione e procedure omogenee;
- adeguata distribuzione spaziale, tale da coprire interamente l'area d'interesse e con un campionamento della stessa coerente con la risoluzione richiesta.

Nel Database ClimaMi, oltre alle canoniche elaborazioni statistiche tipiche della climatologia classica, sono presenti indicatori climatici effettivamente utilizzati dai professionisti come input di calcolo nella modellistica o in supporto alle decisioni.

Il Database ClimaMi contiene 92 indicatori climatici riferiti a:

- 6 settori d'attività professionale;
- 7 diverse variabili meteorologiche;
- 21 stazioni del bacino aerologico milanese;
- 6 dettagli o passi temporali climatici.

5.2.2 Scala spaziale e temporale

Ai fini della valutazione dei cambiamenti climatici l'Organizzazione Mondiale della Meteorologia (WMO) raccomanda il confronto del clima attuale con quello del CLINO 1961-1990, mentre dal 2021 considera il più recente trentennio 1991-2020 come periodo climatico di riferimento standard da utilizzarsi per scopi operativi²⁶ (rif. par. 3.1). Tuttavia, dallo studio della serie storica di temperature del centro di Milano, emerge una evoluzione del clima urbano ancor più rapida, non solo rispetto alla dimensione globale, ma anche con riferimento all'usuale finestra d'osservazione climatica trentennale: a partire dal 1980, e con una tendenza via via sempre più accentuata, la temperatura media annuale è aumentata di quasi mezzo grado a decennio (Fig. 5.2). È inequivocabile la tendenza all'aumento al di là di ogni normale variabilità meteorologica inter-annuale (l'oscillazione dei valori medi di temperatura, in blu, al di sopra e al di sotto della media climatica, in verde, in Figura 5.2). Dopo il 1980 il clima risulta instabile tanto che ci si sta chiedendo se l'usuale trentennio di riferimento (*CLINO CLimatological NOrmal*) abbia ancora un senso per determinati scopi operativi,

²⁵ si veda: <http://www.isprambiente.gov.it/it/temi/cambiamenti-climatici/indicatori-climatici>

²⁶ WMO, Guidelines on the Calculation of Climate Normals, 2017 Edition

come il dimensionamento di un impianto di climatizzazione che dovrà funzionare da qui ai prossimi 20-30 anni.

Per questo motivo riteniamo **importante, nelle attività di progettazione e gestione in ambito urbano, rifarsi anche a indicatori climatici riguardanti i periodi più brevi e recenti che tengano adeguatamente conto dei mutamenti del clima in corso.**

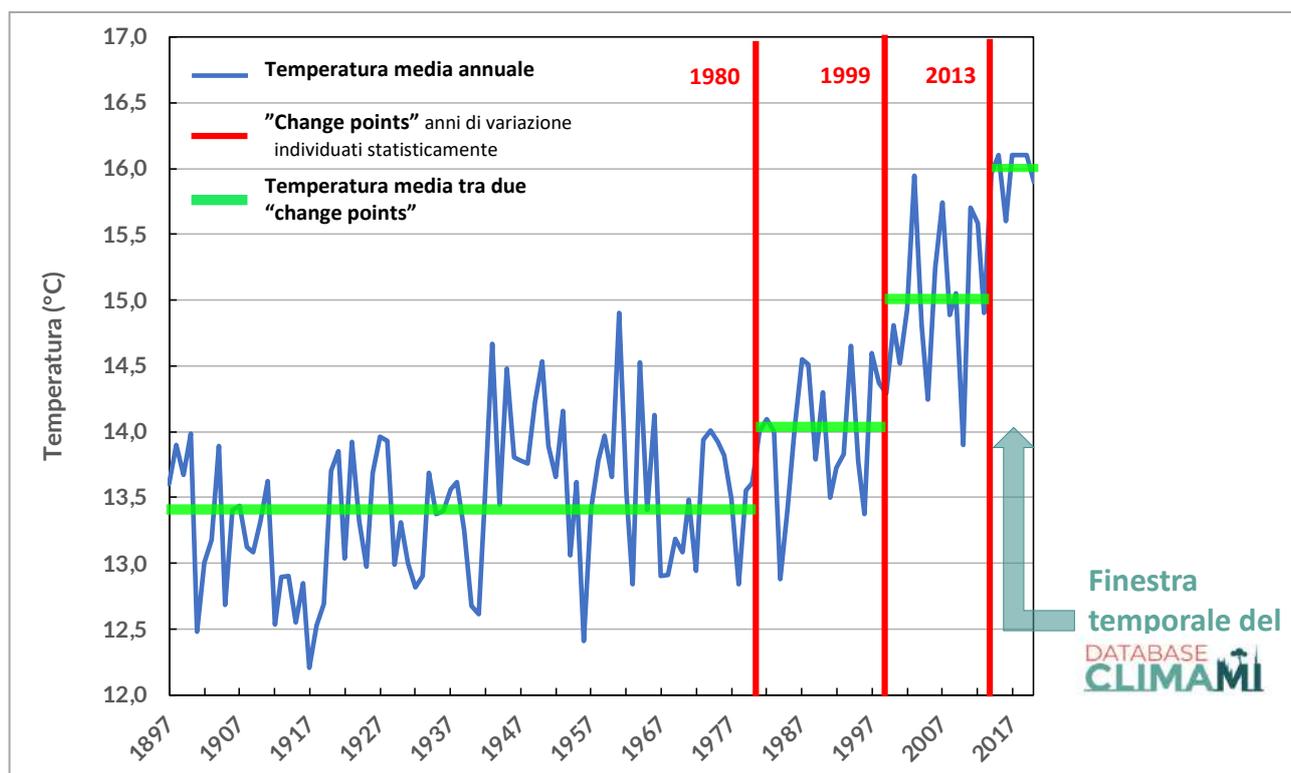


Figura 5.2 Temperatura media annuale in Milano Centro dal 1897 al 2020
(Milano Brera fino agli anni '80, Milano Duomo successivamente)

Il **Database ClimaMi** fornisce indicatori climatici riferiti all'ultimo decennio e precisamente al **periodo dal 1/12/2012 al 30/11/2020**, quindi **otto anni meteorologici** comuni a tutte le stazioni meteo (AWS Automatic Weather Stations) di Fondazione OMD del territorio mostrato in Figura 5.3; fanno eccezione le stazioni di Rho e Milano Sarpi le quali, essendo state installate in periodo più recente, forniscono indicatori riferiti rispettivamente al periodo 1/12/2014 - 30/11/2020 e 1/12/2015 - 30/11/2020.

Gli indicatori climatici sono forniti, a partire da dati meteorologici misurati nel periodo, come elaborazioni statistiche sintetiche riferite a diversi **dettagli o passi temporali**:

- **Decadale** (cioè per ognuna delle 3 decadi che compongono i 12 mesi)

- **Mensile**
- **Stagionale** (dove per stagione si intende la *stagione meteorologica*)
- **Annuale**

Ad essi si aggiungono le due stagioni termiche:

- **Stagione termica invernale**, indicata dal D.P.R. 412/93, che per l'area d'interesse del progetto decorre dal 15/10 al 15/04
- **Stagione termica estiva** (che per convenzione si fa coincidere con l'estate meteorologica)

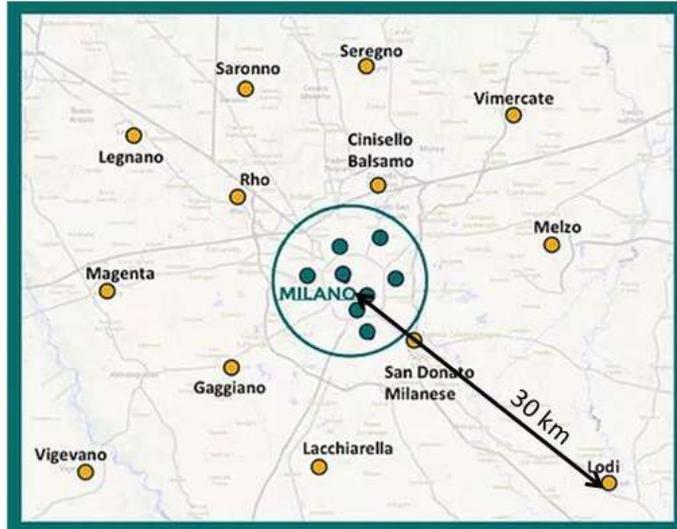
Nel caso della **stagione termica invernale** si è fatto riferimento, per le elaborazioni climatiche, ad un periodo diverso dalla base dati 2013-2020, per utilizzare stagioni termiche intere: **dalla stagione termica 2013/2014 alla stagione termica 2020/2021**.

Per la **fulminazione**, i cui dati non derivano dalle stazioni meteorologiche di Fondazione OMD ma sono forniti da CESI S.p.A.²⁷, il periodo di elaborazione degli indicatori è il **2000-2018 (19 anni)** avendo a disposizione un set di dati comune per tutte le località del progetto ClimaMi a partire dal 2000.

Per la sola località di **Milano Centro**, inoltre, alcuni indicatori inerenti a temperatura e precipitazioni sono disponibili anche per i **CLINO 1961-1990 e 1991-2020**: il confronto tra gli indicatori riferiti ai CLINO e quelli relativi al 2013-2020 permette di **attestare le evoluzioni sostanziali del clima urbano milanese**.

²⁷ <https://www.fulmini.it/>

**Area di applicazione:
BACINO AEROLOGICO MILANESE**



● AWS in Milano ● AWS fuori Milano

PERIODO CONSIDERATO:

- 2013 – 2020 per tutte le stazioni tranne Rho e Milano Sarpi
- 2015 – 2020 per Rho
- 2016 – 2020 per Milano Sarpi
- CLINO 1961-1990 e CLINO 1991-2020 per Milano Centro

DATI nel progetto:

✓ N° 21 stazioni meteo urbane della rete nazionale di **Fondazione OMD**

PUNTI DI FORZA DELLA RETE:

- Criteri omogenei di posizionamento delle stazioni nell'ambiente urbano (top Urban Canopy Layer)
- Stesso tipo di sensori in tutte le stazioni (Vaisala WXT520-530) + sensore ridondato di temperatura
- Tracciabilità metrologica delle misure (riferibilità agli standard metrologici nazionali attraverso una catena ininterrotta di calibrazione)
- Procedure di Controllo di Qualità e Assicurazione di Qualità
- Validazione automatica e manuale giornaliera da parte di meteorologi esperti

✓ **Dati di fulminazione di CESI S.p.A.**



FONDAZIONE
Osservatorio Meteorologico
Milano Duomo

Figura 5.3 Area territoriale e base temporale del Database ClimaMi

5.2.3 Stazioni e Metadata

Le stazioni utilizzate per il calcolo degli indicatori climatici presenti nel Database ClimaMi sono 21, tutte afferenti alla rete di proprietà di Fondazione OMD (Fig. 5.3).

Quella di Fondazione OMD è una rete di stazioni meteorologiche professionali progettata proprio ai fini di monitoraggio meteorologico e climatico nelle città²⁸: le stazioni sono state installate in ambito urbano a livello tetto, cioè al limite superiore dello *Urban Canopy Layer* (o strato della canopea urbana che si estende dal suolo all'altezza media degli edifici), tutte con i medesimi criteri di posizionamento²⁹; fa eccezione solo la stazione di Saronno, che è posizionata su manto erboso a livello strada, rimanendo pur sempre in un contesto urbanizzato. I sensori di rilevamento di ultima generazione, Vaisala WXT520-530³⁰, sono identici in tutti i siti e sottoposti alle medesime e periodiche procedure di controllo e assicurazione qualità. I dati registrati sono disponibili con

²⁸ Frustaci G. et al, 2015

²⁹ Oke T.R., IOM Report Nr. 81, 2004

³⁰ <https://www.vaisala.com/sites/default/files/documents/M210906EN-C.pdf>

dettaglio fino a 10 minuti e vengono validati giornalmente, sia tramite procedure automatiche sia tramite controllo qualitativo e quantitativo da parte di meteorologi e tecnici specializzati.

Le 21 stazioni selezionate per la restituzione del Database ClimaMi sono tutte collocate nel bacino aerologico milanese, il quale comprende non solo la Città Metropolitana di Milano, ma anche una parte delle province limitrofe. Nello specifico gli indicatori climatici sono riferiti a:

- 8 stazioni ubicate nella città di Milano (Milano Bicocca, Milano Bocconi, Milano Bovisa, Milano Centro, Milano Città Studi, Milano San Siro, Milano Sarpi e Milano Sud)
- 8 stazioni nel resto della Città Metropolitana di Milano (Cinisello Balsamo, Gaggiano, Lacchiarella, Legnano, Magenta, Melzo, Rho, San Donato Milanese)
- 1 stazione a Lodi
- 1 stazione a Vigevano
- 1 stazione a Saronno
- 2 stazioni nella provincia di Monza e Brianza (Seregno e Vimercate)

Le 21 stazioni selezionate risultano ben distribuite nel bacino aerologico milanese e mettono in luce le differenze dovute ai rispettivi climi locali; differenze microclimatiche emergono per la stessa città di Milano.

Ogni stazione è descritta dai propri metadata, ovvero tutte quelle informazioni che ne caratterizzano sia la localizzazione che il micro-posizionamento e permettono di comprendere meglio quale strato dell'atmosfera cittadina viene monitorato e quali sono le principali influenze esercitate sulla misura dal tessuto urbano circostante. Nello specifico vengono fornite i seguenti metadata:

- **Data di installazione;**
- **Localizzazione (*siting*)** - coordinate geografiche in WGS84, altezza sul livello del mare dei sensori, distanza dal centro di Milano;
- **Esposizione (*exposure*)** dei sensori, cioè indicazioni inerenti all'esposizione effettiva del singolo sensore (albedo della superficie sottostante, elevazione dei sensori rispetto alla superficie di appoggio, altezza e orientazione delle pareti verticali sottostanti o sovrastanti, distanza dalle pareti in questione);
- **Strumentazione utilizzata:** marca e modello;
- **Incertezza di misura** della temperatura, determinata in base a calibrazione della strumentazione rispetto a standard certificati ed elaborazioni statistiche per il posizionamento e la misura in area ambiente³¹;

³¹ Curci S. et al., 2017

- **Uso del suolo** circostante rispetto allo Urban Atlas 2012³²;
- **Local Climate Zone (LCZ)**³³ di appartenenza secondo WUDAPT-Geopedia³⁴;
- **Classificazione della stazione meteo secondo la WMO-CIMO Guide** ed. 2018 rispetto ai sensori di temperatura e umidità, vento, pressione e radiazione.

Nella finestra di interfaccia del DB deputata alla selezione singola o multipla delle stazioni meteo (Fig. 5.1), Milano Centro compare tre volte in riferimento rispettivamente alla finestra temporale del DB e ai due CLINO considerati per poter accedere ai relativi indicatori climatici (è l'unica stazione per cui occorre selezionare il periodo climatico di riferimento).

5.2.4 Le variabili fondamentali e le incertezze di misura

Gli indicatori climatici del Database ClimaMi sono riconducibili a 6 variabili meteorologiche fondamentali³⁵:

- Temperatura dell'aria (°C)
- Umidità relativa (%)
- Pressione atmosferica (hPa)
- Precipitazioni (cumulate e intensità) (mm, mm/h)
- Vento (direzione e velocità) (°, m/s)
- Radiazione solare (W/m²)

A queste si aggiunge una settima variabile:

- i fulmini nube-suolo, calcolati come numero di colpi sulla superficie comunale (quest'ultima fonte ISTAT), rilevati da CESI S.p.A.³⁶

5.2.4.a Temperatura dell'aria

I sensori di temperatura delle stazioni di Fondazione OMD hanno una incertezza di misura strumentale certificata in camera climatica di ± 0.2 °C per valori compresi tra -20.0 °C e +50.0 °C; uno studio statistico effettuato a partire dalle stazioni site nella città di Milano ha permesso di stimare, per tutte le stazioni utilizzate nel progetto, una incertezza aggiuntiva nella misura a campo dovuta all'ambiente circostante, che varia tra 0.3 °C e 0.9 °C³⁷.

Gli indicatori climatici afferenti alla sola temperatura sono ben 38, così sintetizzabili:

- Temperatura media; media delle minime; media delle massime; minima assoluta; massima assoluta

³² <https://land.copernicus.eu/local/urban-atlas/urban-atlas-2012?tab=mapview>

³³ Stewart, I.D. et al., 2012

³⁴ <http://www.wudapt.org/view-lcz-maps/>

³⁵ <https://gcos.wmo.int/en/essential-climate-variables/ecv-factsheets>

³⁶ <https://www.fulmini.it/public/sirf/default.asp>

³⁷ Frustaci et al., 2017

- Gradi Giorno Invernali (somma delle sole differenze positive tra una temperatura convenzionalmente fissata a 20 °C e la temperatura media giornaliera)
- Somme Termiche a tre diverse soglie (0 °C, 5 °C e 10 °C), calcolate come somma delle differenze positive tra la temperatura media giornaliera e la soglia prefissata
- Numero medio di giorni di gelo, di ghiaccio e massimo numero di giorni consecutivi raggiunto per ciascuno di essi; numero medio annuo di giorni consecutivi; distribuzione di frequenza media di giornate consecutive.
- Numero medio di notti tropicali, di giornate di calura e massimo numero di giorni consecutivi per ciascuna categoria di evento; numero medio annuo di giorni consecutivi; distribuzione di frequenza media di eventi consecutivi
- Ondate di Calore³⁸ (par. 4.2.6, conteggiate in riferimento al CLINO 1961-1990; nello specifico sono disponibili):
 - il numero medio annuo di giorni con temperature minime e massime giornaliere al di sopra delle rispettive soglie³⁹
 - il massimo numero di giorni consecutivi raggiunto con minime e massime al di sopra delle suddette soglie
 - il numero medio annuo di giorni consecutivi con minime e massime al di sopra delle soglie
 - la distribuzione di frequenza media di almeno 2 giornate consecutive
- le massime Escursioni Giornaliere di Temperatura per i diversi dettagli temporali, intese come differenza tra la temperatura massima e la temperatura minima giornaliera; la media delle massime escursioni giornaliere a partire, per ogni dettaglio temporale, dalle massime escursioni giornaliere di ogni anno: una media, quindi, effettuata in questo caso sui valori massimi degli 8 anni di finestra del DB ClimaMi

Inoltre, sono disponibili:

- i valori orari del Giorno Medio della temperatura
- le **Temperature Esterne Invernali di Progetto**, sia per edifici con **involucro leggero** che per edifici con **involucro pesante/normale** (NB: selezionabili solo per dettaglio temporale annuale)

³⁸ WMO WHO, Heatwaves and Health: Guidance on Warning-System Development, 2015

³⁹ Sono giornate che se si susseguono per almeno due volte individuano una Ondata di Calore, ma che nel complesso (ovvero includendo anche le singole giornate) forniscono una quantificazione dell'occorrenza di situazioni di calore estremo

- le **Temperature Esterne Estive di Progetto** (NB: selezionabili solo per dettaglio temporale annuale; nel DB compare con la dicitura Temperatura media delle massime giornaliere (°C) – si veda Glossario)

5.2.4.b Umidità relativa

I sensori di umidità relativa delle stazioni di Fondazione OMD hanno una incertezza di misura strumentale quantificata nel $\pm 3\%$. Sono 8 gli indicatori riferibili strettamente a tale variabile. Cinque sono gli indicatori tipici della climatologia classica, che derivano dalla statistica elementare sui dati di umidità giornalieri:

- Umidità Relativa media; media delle minime; media delle massime; minima assoluta; massima assoluta

Forniscono invece una modulazione climatica a livello orario:

- il Giorno Medio dell'umidità relativa
- il Numero medio di ore con umidità relativa media al di sotto del 10% e al di sopra del 90%.

5.2.4.c Pressione atmosferica

Due sono gli indicatori rilasciati per questa variabile fondamentale:

- la Pressione Atmosferica media
- il Giorno Medio orario della pressione

5.2.4.d Precipitazioni

Sono 16 gli indicatori del Database ClimaMi correlati alle precipitazioni; questi non sono disponibili per la stazione di Milano San Siro.

Alle **precipitazioni cumulate** (ovvero le altezze in millimetri) sono dedicati:

- la Precipitazione Cumulata, media e mediana
- il Numero medio di giorni con pioggia (≥ 1 mm) o senza pioggia (< 1 mm), rispettive consecutività massima/media e distribuzione di frequenza media
- il Numero medio di **Eventi Intensi** con precipitazioni al di sopra di una certa soglia in un determinato intervallo di tempo (**almeno 5 mm in 10 minuti; 15 mm in 30 minuti; 30 mm in 60 minuti**)

Vi sono anche indicatori riferiti all' **intensità di precipitazione** (che si misura in millimetri all'ora):

- Intensità di Precipitazione media, mediana, massima assoluta e media delle massime assolute (nelle elaborazioni degli indicatori non sono ovviamente conteggiati gli intervalli senza precipitazione).

5.2.4.e Vento

Sono 15 gli indicatori climatici correlati al vento, di varia natura.

Gli indicatori derivanti dai valori medi e massimi giornalieri di **velocità del vento** sono:

- velocità del vento media, velocità del vento mediana, velocità del vento massima assoluta e velocità del vento media delle massime giornaliere

Gli indicatori relativi alla **raffica**⁴⁰, a partire dai dati campionati a 10 minuti, sono:

- raffica media giornaliera e raffica massima assoluta
- numero medio di eventi con raffica al di sopra di prestabilite soglie (5 m/s; 10 m/s; 15 m/s; 20 m/s)

Per la **direzione del vento**, anch'essa riferibile a dati misurati di 10 minuti, sono disponibili:

- direzione prevalente del vento (in gradi)
- **Rosa dei venti** sui 16 settori di provenienza, **per 8 intervalli di velocità**

Inoltre, a partire dai valori medi orari di velocità e direzione del vento, è calcolato:

- il Giorno Medio della velocità del vento.
- il Giorno Medio della direzione risultante (in gradi)
- il Giorno Medio della direzione prevalente (in settori) con la relativa frequenza di accadimento

5.2.4.f Radiazione solare

Sono 3 gli indicatori derivanti dai valori medi e massimi giornalieri di radiazione solare globale:

- radiazione solare globale media, massima assoluta e media delle massime

Dai valori medi orari è inoltre calcolato:

- il Giorno Medio di radiazione solare globale

Poiché il radiometro, per l'intero periodo considerato, era presente solo presso la stazione di Milano Città Studi, gli indicatori ricavati dalla radiazione sono disponibili al momento soltanto per questa stazione.

5.2.4.g Fulmini

I dati di fulminazione derivano dalla rete SIRF di CESI S.p.A.

L'indicatore fornito nel Database ClimaMi è:

- il Numero medio di fulmini nube-suolo per km² all'interno dell'area comunale

⁴⁰ Si veda il Glossario per la definizione

A tutte le stazioni della città di Milano è associato il medesimo valore riferito all'intera area comunale.

5.2.5 Indicatori derivati

Nel database sono inoltre presenti 8 indicatori basati sull'**Indice Humidex**⁴¹.

A differenza dei casi precedenti, questi indicatori non sono associabili ad una sola variabile fondamentale, ma contemporaneamente a temperatura e umidità dell'aria che sono nel complesso responsabili della percezione di calore da parte del corpo (par. 4.2.6). L'Indice Humidex viene calcolato tramite la seguente formula semi-empirica:

$$Humidex (°C) = T + \frac{5}{9} * (6,11 * \frac{UR}{100} * 10^{\frac{7,5*T}{237,7+T}} - 10)$$

Nel Database di ClimaMi l'Indice Humidex è calcolato a partire dai dati orari di temperatura (T) e umidità relativa (UR). Questa accortezza di calcolo è fondamentale, essendo T e UR non correlate tra loro. Sono disponibili i seguenti indicatori climatici:

- Humidex medio giornaliero
- Humidex orario - massimo assoluto e media dei massimi assoluti
- Numero medio di giorni ed ore al di sopra di determinate soglie di stress termoigrometrico (35°C, soglia di malessere intenso; 40°C, soglia di pericolo).

A partire dall'Indice Humidex, che va interpretato come la percezione di calore da parte dell'uomo (e si misura in °C) deriva inoltre il seguente indicatore climatico:

- Gradi Giorno Estivi (GGE) – valor medio della stagione termica estiva (par. 4.2.2, Figg. 4.6, 4.7)

5.2.6 Organizzazione logica del Database

Il Database ClimaMi è studiato e strutturato in maniera tale da essere operativamente di supporto ai professionisti che, nella loro attività, si trovino a dover utilizzare dati climatici. Nella figura seguente è riportato lo schema logico su cui è costruita l'interfaccia utente, che accompagna il professionista nella selezione e nello scarico degli indicatori di interesse tra i 92 disponibili (Figura 5.4).

Le quattro selezioni a cascata permettono di ottenere, in base alle scelte effettuate, un set ristretto di indicatori climatici, che corrisponderà alle esigenze effettive di colui che interroga il Database.

⁴¹ Masterson, J.M., 1979

Una volta selezionati gli indicatori di interesse, questi vengono trasmessi tramite posta elettronica come file in formato .csv; saranno accompagnati inoltre dai metadata corrispondenti alle stazioni prescelte e, per indicatori derivati dalla temperatura, dall'incertezza di misura.

Le effettive corrispondenze degli indicatori con settori di appartenenza, stazioni meteo, variabili fondamentali e dettagli temporali sono consultabili nell'Appendice B.

Per i vari ambiti d'azione sono disponibili:

- Pianificazione territoriale - 61 indicatori
- Progettazione edificio-impianto - 60 indicatori
- Energia - 31 indicatori
- Gestione del deflusso meteorico - 17 indicatori
- Salute e benessere - 51 indicatori
- Gestione del verde pubblico - 67 indicatori

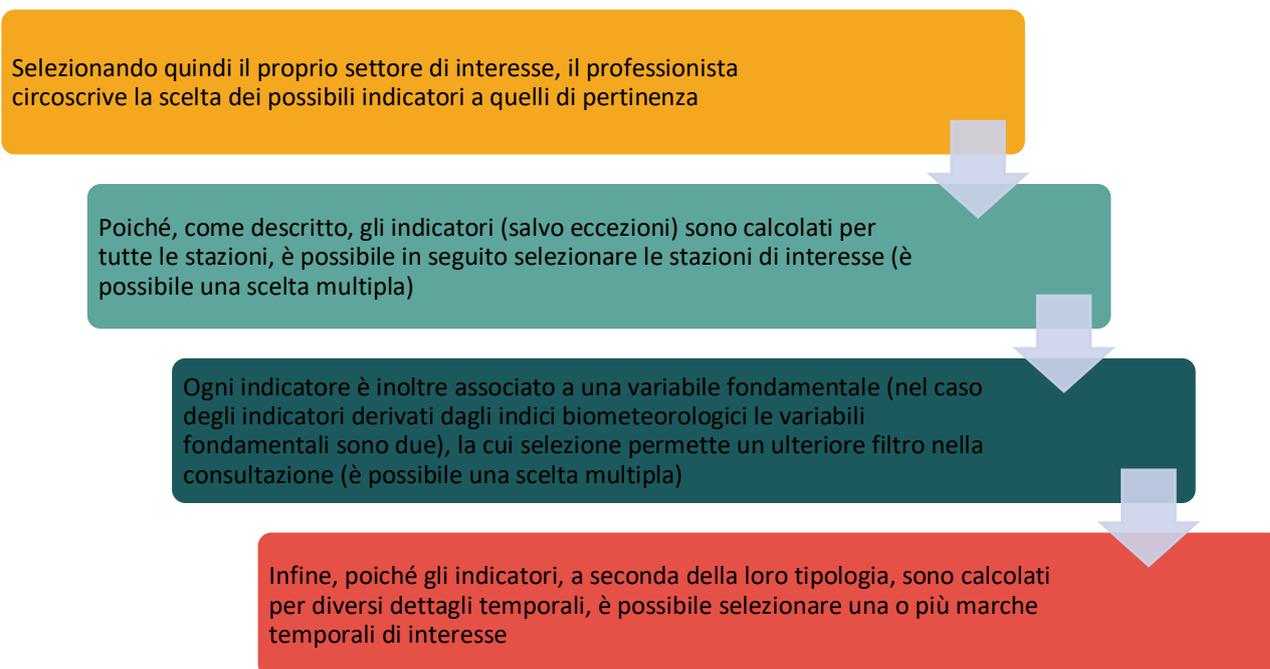


Figura 5.4. Schema logico dell'organizzazione del Database ClimaMi

5.3 L'Atlante Climatico Delle Temperature Dell'aria

Gli indicatori climatici descritti nei precedenti capitoli sono fondamentali per le attività di progettazione e gestione del territorio. Tuttavia, essi sono ricavati da dati puntuali di stazione e rappresentativi, di conseguenza, di un'area limitata.

L'Atlante Climatico della Temperatura dell'Aria consiste in una **raccolta di mappe che restituiscono la distribuzione spaziale dei valori di temperatura atmosferica estiva e invernale del periodo 2016-2019** nella canopea urbana:

- su un grigliato regolare ad **alta risoluzione** (celle di 100 metri x 100 metri)
- nei centri urbani e nelle aree rurali **non dotati di stazione meteorologica**

Un'importante precisazione: le mappe dell'Atlante restituiscono la *Temperatura dell'Aria* (variabile atmosferica), cioè la temperatura dello strato atmosferico prossimo al suolo che viene percepita dal corpo umano; questa non è assolutamente da confondersi con la *Land Surface Temperature LST* (variabile geofisica), che rappresenta invece la temperatura delle superfici e dei materiali al suolo, ottenibile dai monitoraggi satellitari. Per approfondire l'argomento e il legame tra le due grandezze si rimanda alla relativa Appendice D.2.

Le informazioni climatiche contenute nell'Atlante possono essere incrociate e correlate con altri dati georeferenziati, quali la densità di popolazione e l'uso del suolo, contribuendo così ai processi decisionali, progettuali e gestionali.

Particolarmente utile ai fini delle attività di pianificazione e progettazione territoriale (si veda Par.4.2.4) è l'analisi congiunta con gli strati dei **database topografici istituzionali**, da quelli Comunali a quelli di Regione Lombardia. Nelle sottostanti figure si riporta un esempio di sovrapposizione con il DUSAF *Destinazione d'Uso dei Suoli Agricoli e Forestali di Regione Lombardia* (Figg. 5.5, 5.6).

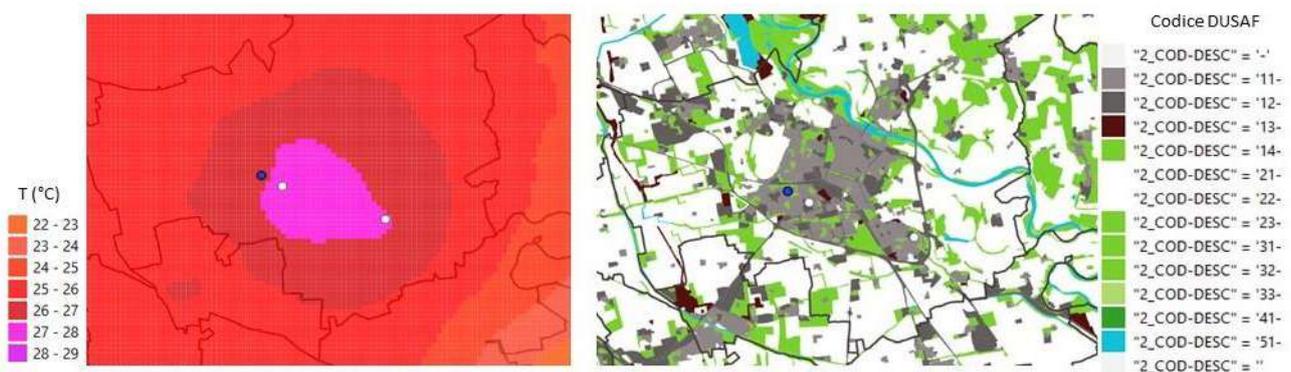


Figura 5.5. Immagini estratte dall'Atlante della Temperatura dell'Aria e dal DUSAF per il Comune di Lodi



Figura 5.6 Sovrapposizione delle due precedenti immagini (Atlante Temperatura Aria + DUSAF)

L'area geografica coperta dall'Atlante corrisponde al bacino aerologico milanese: si estende dai confini nord della provincia di Monza e Brianza, a sud del Comune di Pavia; dai confini occidentali di Città Metropolitana di Milano (CMM) e del Vigevanese a quelli orientali della CMM e del Lodigiano (Fig. 5.7).

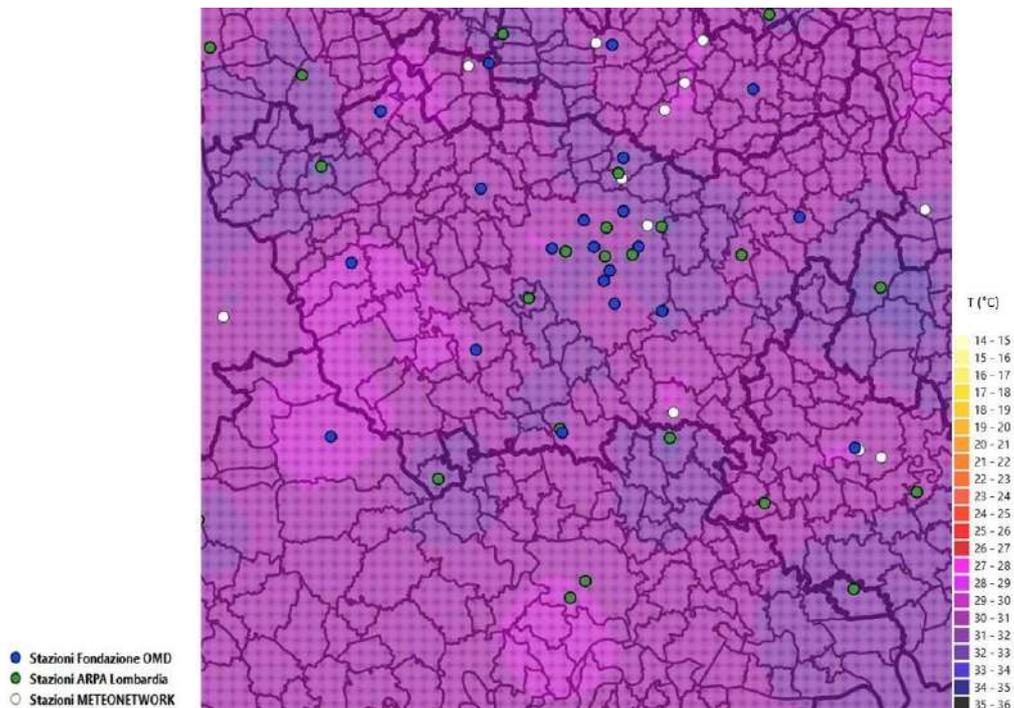


Figura 5.7 Dominio ed esempio di mappa estiva di temperatura dell'aria dell'Atlante Climatico

Per ognuna delle mappe di temperatura è disponibile anche la corrispettiva mappa delle incertezze di stima (Figura 5.8).

I valori di incertezza tendono a essere più bassi nelle aree prossime alle stazioni utilizzate per la realizzazione delle mappe, mentre sono tendenzialmente più elevati lontano da esse o ai limiti del dominio.

Per ogni cella del grigliato sono quindi disponibili i valori di temperatura dell'aria e relativa incertezza.

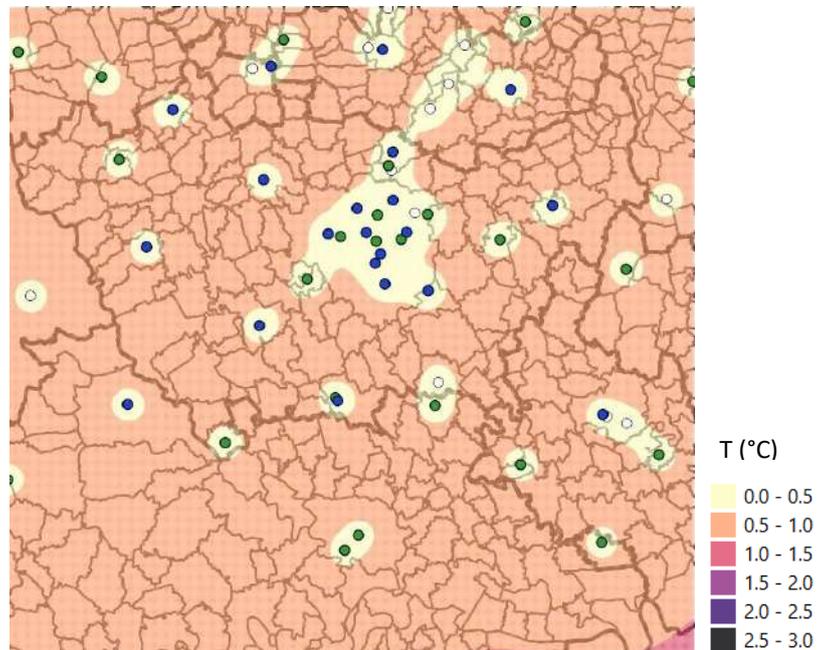


Figura 5.8 Esempio di associata mappa delle incertezze di temperatura

5.3.1 Isola di Calore: le Situazioni Tipo Climatiche (STC)

L'Atlante delle Temperature dell'Aria è finalizzato a caratterizzare fenomeni ed eventi estremi di tipo termico. Tra i fenomeni climatici che si verificano non solo nelle grandi città ma anche nei centri più piccoli, particolarmente importante è l'**isola di calore (UHI Urban Heat Island)**. L'UHI si forma nelle aree urbanizzate non solo in funzione della densità e delle caratteristiche fisiche e geometriche di urbanizzazione (si veda par. 3.2) ma anche dell'accadimento di determinate situazioni meteorologiche. In funzione delle condizioni atmosferiche l'isola di calore non assume sempre le medesime caratteristiche e distribuzioni spaziali: **a seconda dell'ora della giornata, della stagione e della situazione meteorologica in atto l'UHI può risultare più o meno intensa e centrata su differenti zone dell'area urbana.**

Per dare una rappresentazione il più realistica possibile delle distribuzioni di temperatura dell'aria sul bacino aerologico di interesse, sono state individuate differenti **Situazioni Tipo Climatiche** (da qui in poi **STC**), a cui a loro volta corrispondono diverse condizioni di isola di calore.

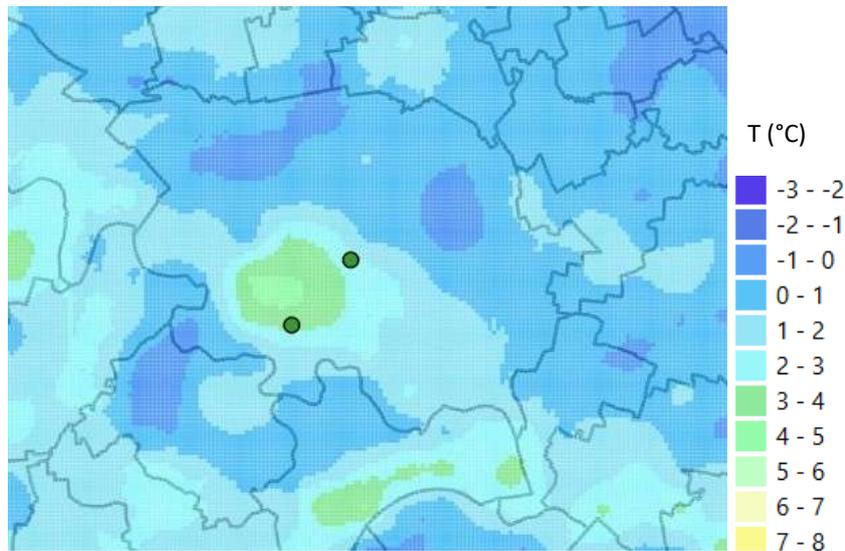


Figura 5.9 Isola di calore invernale nella città di Pavia

Poiché l'isola di calore, a Milano e nei centri urbani più in generale, risulta particolarmente **intensa nelle stagioni estiva** (giugno, luglio e agosto) e **invernale** (dicembre, gennaio e febbraio), le STC sono state individuate con riferimento a questi due trimestri. Inoltre, è proprio in queste due stagioni che si raggiungono i valori di temperatura più estremi, che devono essere considerati dai professionisti in fase di progettazione e pianificazione.

Le STC individuano situazioni mattutine (fascia oraria tra le 10 e le 12) e serali (fascia oraria tra le 21 e le 23) in dipendenza dagli orari in cui si hanno a disposizione i dati satellitari (si veda a Appendice D). Tali orari non corrispondono a quelli in cui tipicamente si registrano le minime e le massime giornaliere di temperatura dell'aria; 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 più elevata. Le STC sono state denominate in funzione della localizzazione della UHI nell'area urbanizzata più estesa del bacino comprendente Milano e i centri limitrofi:

- **ESTATE UHI_Centro 22:00**: situazione estiva serale con isola di calore più intensa sulla parte centrale della città di Milano o diffusa in maniera omogenea
- **ESTATE UHI_Est 22:00**: situazione estiva serale con isola di calore più intensa nella parte orientale milanese
- **ESTATE UHI_Nord-Ovest 22:00**: situazione estiva serale con isola di calore più intensa nella parte centrale di Milano città e con tendenza ad espandersi verso nord-ovest
- **INVERNO UHI_Centro 11:00**: situazione invernale mattutina con isola di calore più intensa nella parte centro-orientale milanese

- **INVERNO UHI_Nord-Est 11:00**: situazione invernale mattutina con isola di calore più intensa nella parte nord-orientale di Milano e con tendenza ad espandersi verso nord-est
- **INVERNO UHI_Ovest 11:00**: situazione invernale mattutina con isola di calore più intensa nella parte occidentale di Milano e con tendenza ad espandersi verso ovest
- **INVERNO UHI_Centro 22:00**: situazione invernale mattutina con isola di calore più intensa coinvolgente gran parte dell'urbanizzato di Milano
- **INVERNO UHI_Est 22:00**: situazione invernale mattutina con isola di calore più intensa nella parte orientale dell'urbanizzato di Milano

Le STC, classificate a partire dai dati orari misurati dalle stazioni meteo convenzionali di oltre 4 anni, presentano le frequenze di accadimento visualizzate in Figura 5.10. Le mattine estive non sono soggette a isola di calore significativa e anzi spesso in tali orari non si è ancora formata l'UHI, pertanto per esse non sono state individuate STC ed elaborate mappe dell'Atlante.

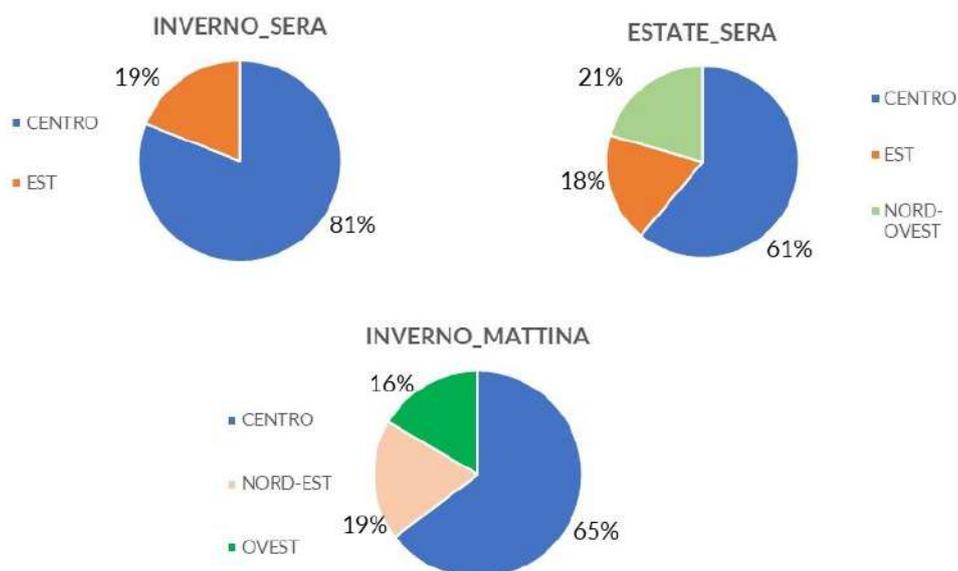


Figura 5.10 Frequenze di accadimento delle Situazioni Tipo Climatiche nelle diverse stagioni e fasce orarie

È interessante osservare come le STC presentino delle frequenze di accadimento molto diverse a seconda della stagione e della fascia oraria: questo rimarca come l'isola di calore non assume sempre le medesime distribuzioni spaziali. Un esempio è mostrato per l'Estate UHI sera (Figg 5.11, 5.12, 5.13).

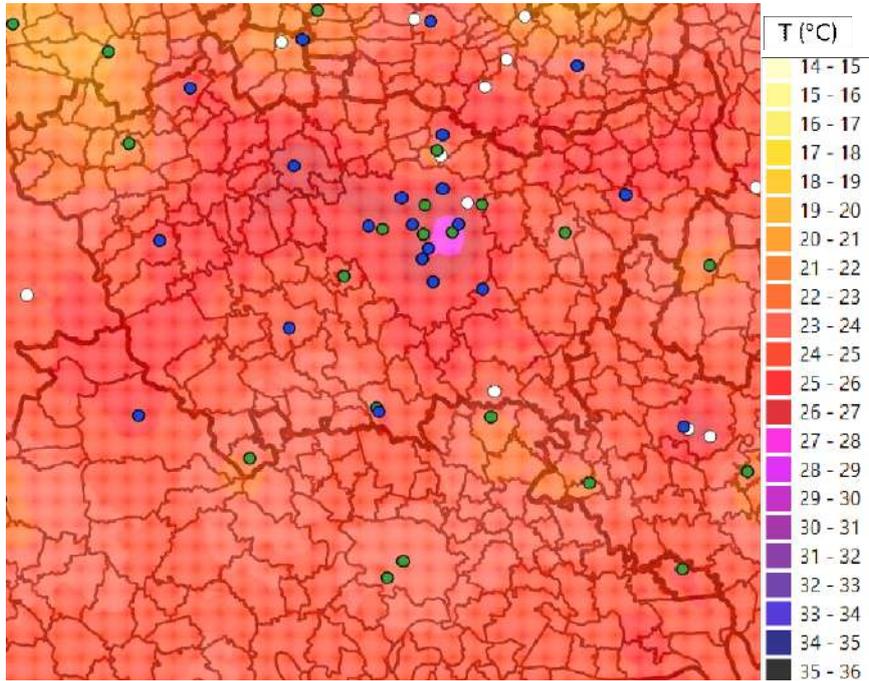


Figura 5.11 Temperatura media dell'aria in ESTATE UHI Centro 22:00

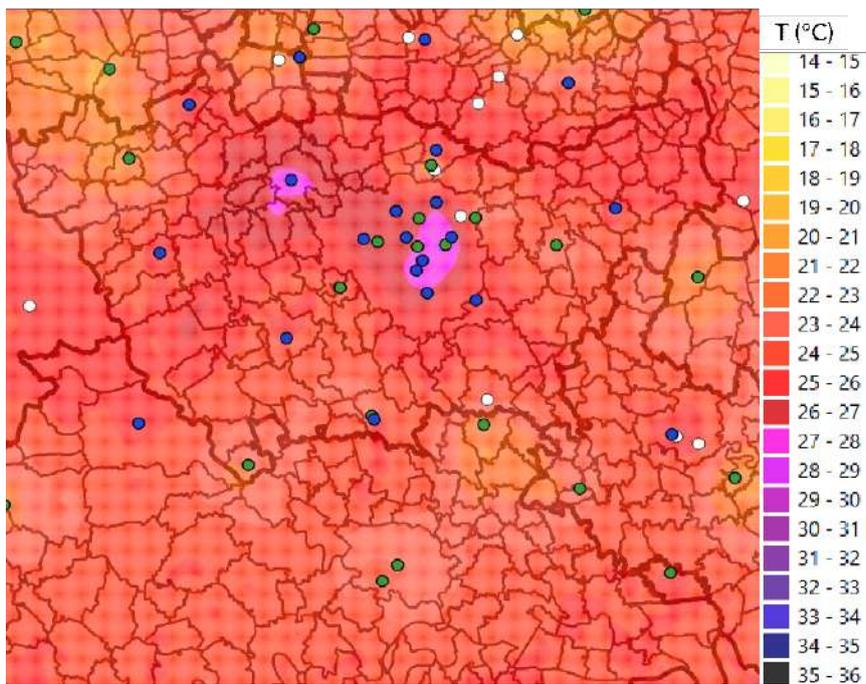


Figura 5.12 Temperatura media dell'aria in ESTATE UHI Est 22:00

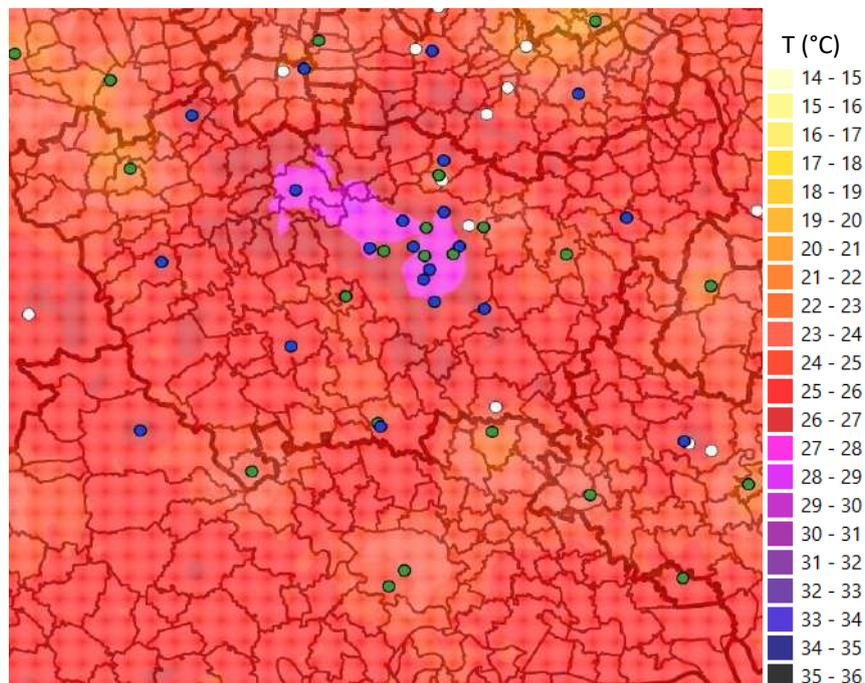


Figura 5.13 Temperatura media dell'aria in ESTATE UHI Nord-Ovest 22:00

L'Atlante restituisce anche una sintesi della distribuzione media stagionale di temperatura dell'aria sul territorio, sulla base dei pesi delle diverse STC in ogni stagione e fascia oraria (le frequenze di accadimento – Fig 5.10). Sono disponibili le seguenti **mappe di temperatura media stagionale dell'aria**:

- **ESTATE UHI 22:00**: mappa rappresentativa della temperatura dell'aria media nelle serate estive soggette a forte isola di calore. (Figura 5.13)
- **INVERNO UHI 11:00**: mappa rappresentativa della temperatura dell'aria media nelle mattine invernali soggette a forte isola di calore
- **INVERNO UHI 22:00**: mappa rappresentativa della temperatura dell'aria media nelle serate invernali soggette a forte isola di calore (Figura 5.14)

Per ogni stagione e fascia oraria è inoltre disponibile l'**estremo stagionale**, cioè la mappa che rappresenta la situazione **più fredda o più calda** (a seconda della stagione) tra tutte quelle analizzate:

- massima ESTATE UHI 22:00 (Figura 5.16)
- minima INVERNO UHI 11:00
- minima INVERNO UHI 22:00 (Figura 5.17)

Si ricorda che ogni mappa di temperatura dell'aria è accompagnata dalla corrispettiva mappa delle incertezze.

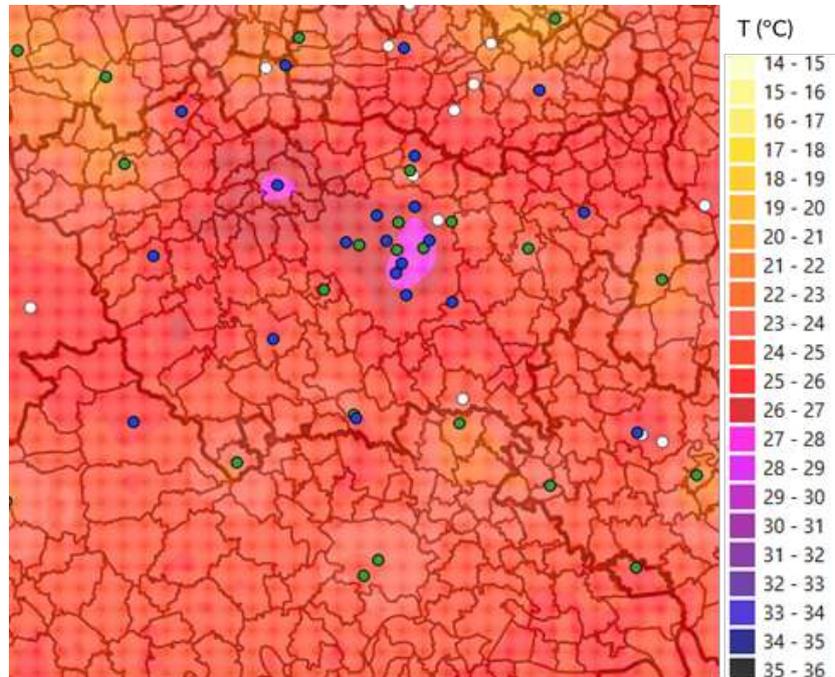


Figura 5.14 Media stagionale di Temperatura dell'aria: ESTATE UHI 22:00

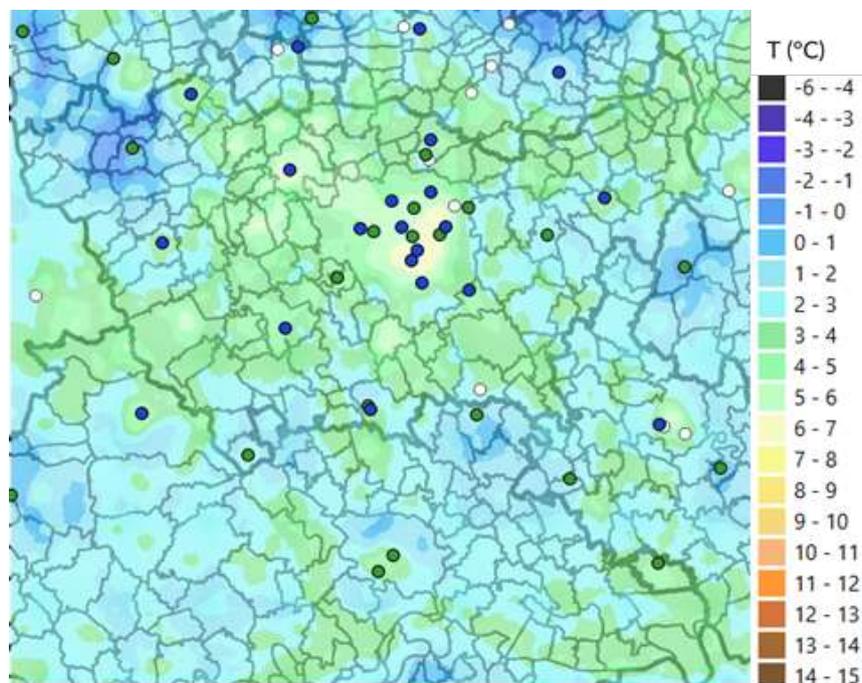


Figura 5.15 Media stagionale di Temperatura dell'aria: INVERNO UHI 22:00

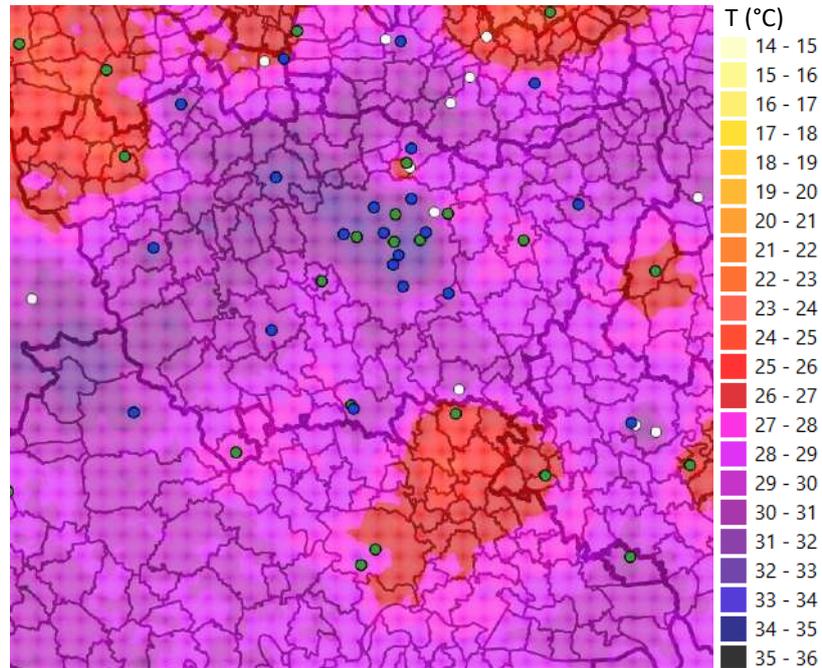


Figura 5.16 Estremo stagionale di temperatura dell'aria: massima ESTATE UHI 22:00

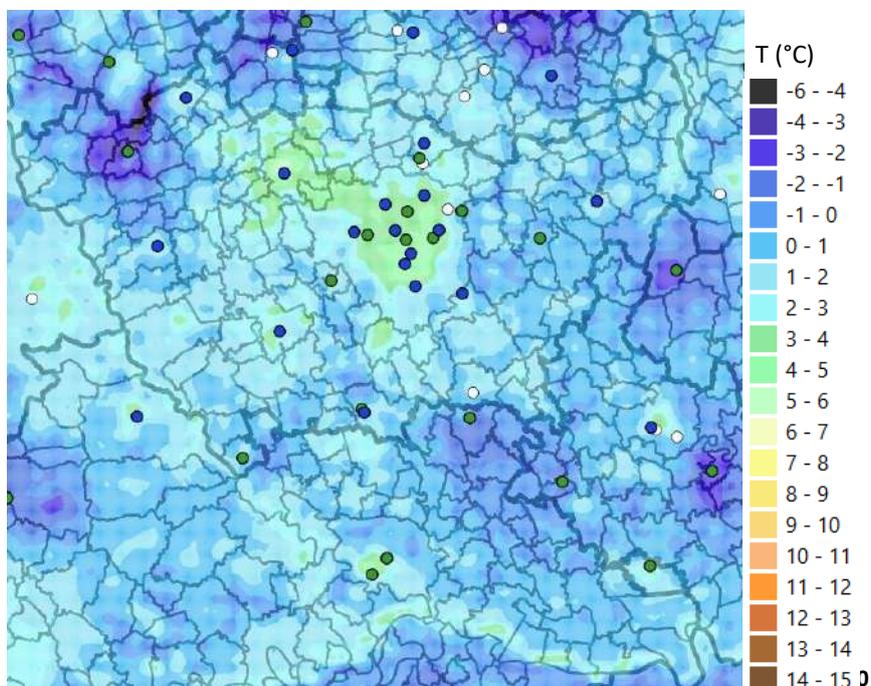


Figura 5.17 Estremo stagionale di temperatura dell'aria: minima INVERNO UHI 22:00

5.3.2 Ondate di Calore

Con **Ondata di Calore** (WMO, *Heatwaves and Health: Guidance on Warning-System Development, 2015*) si intende un *evento estremo di caldo intenso* in cui, per almeno due giorni consecutivi, le temperature minime e massime giornaliere superano determinate soglie (si veda Appendice D.2). Si tratta di situazioni meteorologiche caratterizzate da temperature molto elevate e perduranti.

L'ondata di calore, quindi, è un fenomeno legato alla stagione estiva, al contrario dell'isola di calore che può presentarsi in maniera molto marcata anche in inverno.

Tuttavia, in determinate circostanze, l'isola di calore urbana può accentuare ulteriormente l'ondata di calore nelle aree urbane.

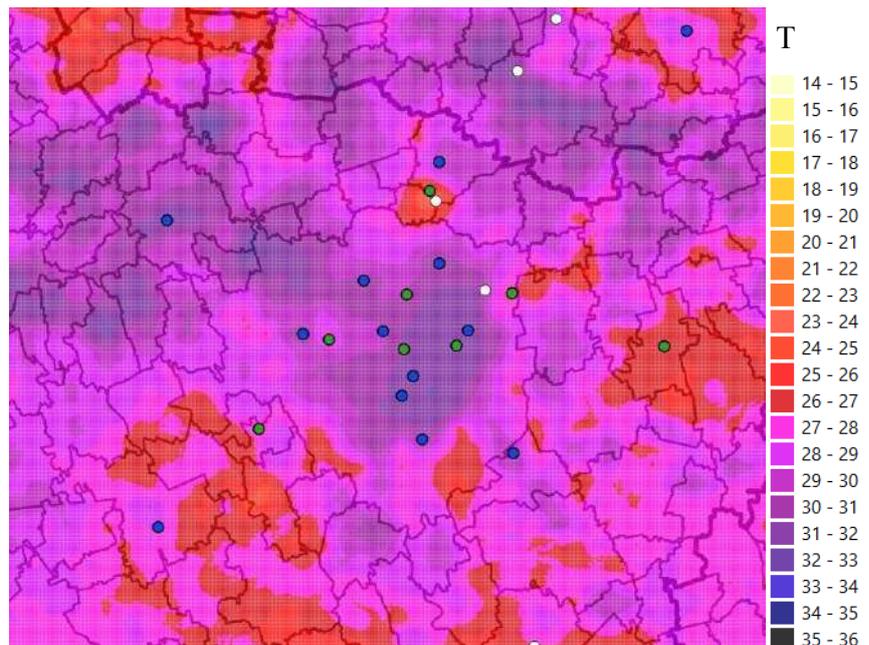


Figura 5.18 Situazione di isole di calore nel milanese in presenza di ondata di calore

Anche gli **episodi di ondata di calore presentano diverse configurazioni e distribuzioni spaziali di temperatura**. L'Atlante ne contiene tre diverse tipologie, denominate in funzione della localizzazione dei massimi di temperatura nell'area urbanizzata più estesa del bacino comprendente Milano e i centri limitrofi:

- **ONDATA DI CALORE Centro** con temperature massime coinvolgenti gran parte dell'urbanizzato di Milano
- **ONDATA DI CALORE Nord-Ovest** con temperature massime sulla direttrice Nord-Ovest dell'urbanizzato milanese
- **ONDATA DI CALORE Nord-Est** con temperature massime sulla direttrice Nord-Est dell'urbanizzato milanese

Le frequenze di accadimento delle tre diverse tipologie, nelle 5 stagioni estive considerate, sono riportate in Figura 5.19.



Figura 5.19 Frequenze di accadimento delle tipologie di distribuzione spaziale delle Ondate di Calore

Per ogni tipologia di ondata di calore è disponibile la **mappa media di temperatura dell'aria**; si possono quindi consultare:

- **ONDATA CALORE Centro 11:00**: ondate di calore mattutine con temperature elevate diffuse in maniera omogenea sull'area
- **ONDATA CALORE Nord-Est 11:00**: ondate di calore mattutine con temperature più elevate sulla zona nord-orientale della città di Milano e del bacino aerologico
- **ONDATA CALORE Nord-Ovest 11:00**: ondate di calore mattutine con temperature più elevate sulla zona nord-occidentale della città di Milano e del bacino aerologico
- **ONDATA CALORE Centro 22:00**: ondate di calore serali con temperature più elevate diffuse in maniera omogenea sull'area
- **ONDATA CALORE Nord-Est 22:00**: ondate di calore serali con temperature più elevate sulla zona nord-orientale della città di Milano e del bacino aerologico
- **ONDATA CALORE Nord-Ovest 22:00**: ondate di calore serali con temperature più elevate sulla zona nord-occidentale della città di Milano e del bacino aerologico

La media pesata delle diverse tipologie di Ondata di Calore per ogni fascia oraria, calcolata sulla base delle relative frequenze di accadimento, ha permesso di ottenere la mappa dell'**episodio medio di Ondata di Calore mattutino e serale** e la mappa della relativa incertezza:

- **Media di ONDATA DI CALORE 11:00**: mappa rappresentativa della temperatura media dell'aria nelle mattine interessate da ondata di calore (Figura 5.20)
- **Media di ONDATA DI CALORE 22:00**: mappa rappresentativa della temperatura media dell'aria nelle sere interessate da ondata di calore

Per ogni fascia oraria è inoltre disponibile l'**episodio estremo di Ondata di Calore**, cioè la mappa che rappresenta la situazione **più calda** tra tutte quelle analizzate nonché la relativa incertezza:

- massima ONDATA DI CALORE 11:00 (Figura 5.22)
- massima ONDATA DI CALORE 22:00

Le mappe evidenziano come **le temperature, durante le ondate di calore, presentino delle notevoli differenze tra gli episodi del mattino e quelli serali, sia in termini di valori assoluti sia in termini di distribuzione spaziale.** In Figura 5.23 è possibile osservare l'evoluzione di una ondata di calore in tre diverse ore di una stessa giornata.

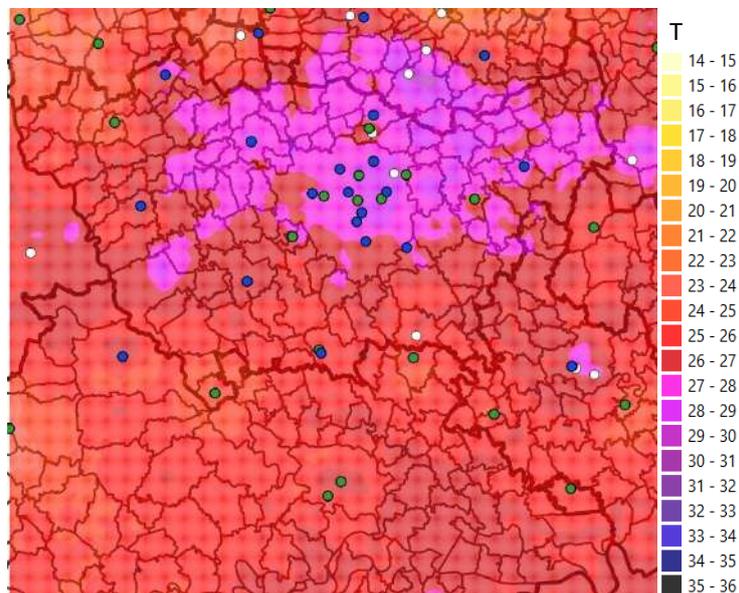


Figura 5.20 Media di ONDATA di CALORE Nord-Est 22:00

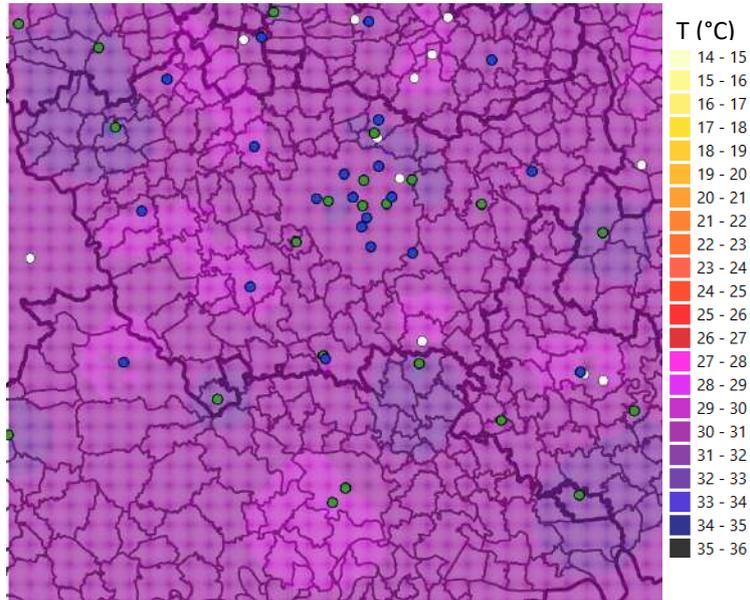


Figura 5.21 Media di ONDATA di CALORE 11:00

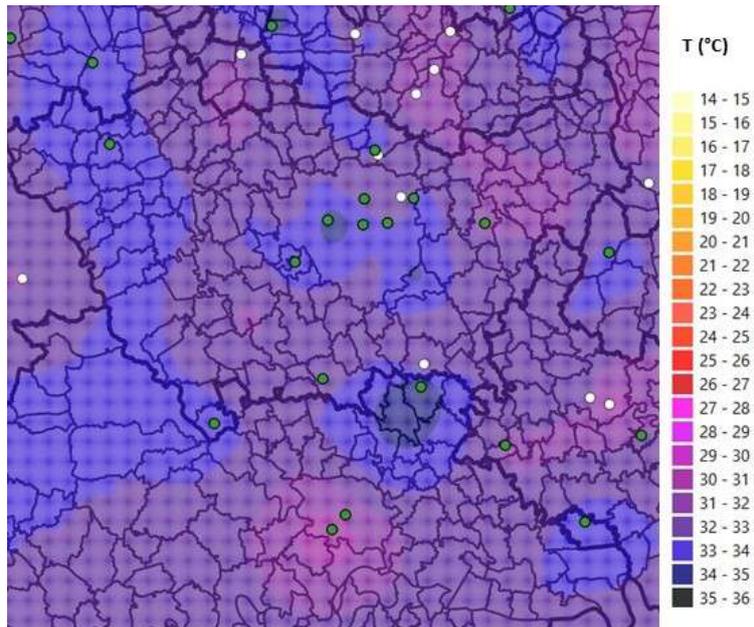


Figura 5.22 Massima ONDATA DI CALORE 11:00

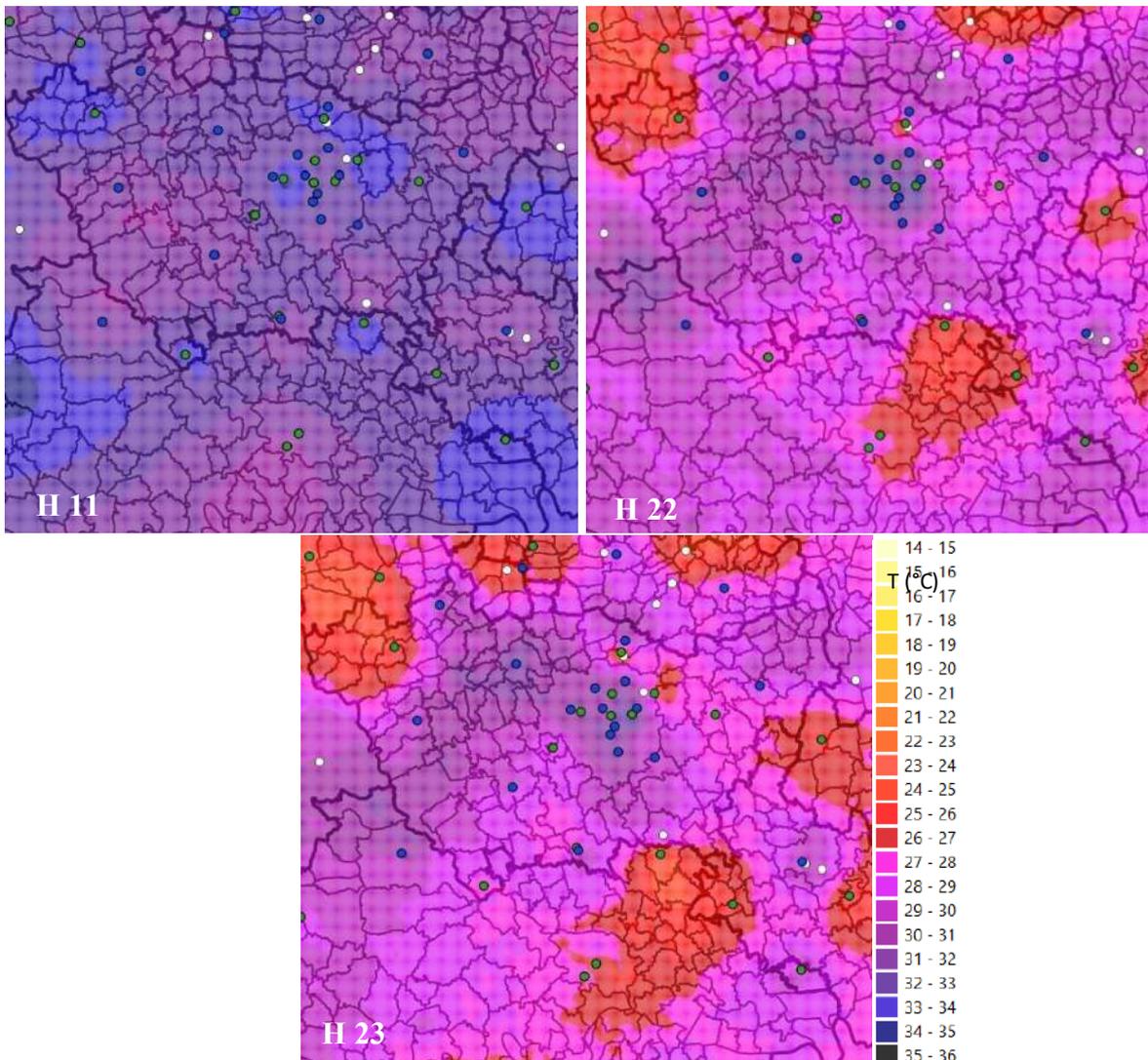


Figura 5.23 Evoluzione oraria dell'Ondata Calore del 26/06/2019

5.3.3 Contenuti dell'Atlante

L'Atlante ClimaMi, realizzato in **WebGIS**, è studiato e strutturato in maniera tale da essere operativamente di supporto ai professionisti che, nella loro attività, necessitano di dover utilizzare dati climatici di temperatura dell'aria con alta risoluzione spaziale, per zone prive di stazioni meteorologiche di riferimento e potendoli confrontare e correlare con dati topografici istituzionali. È possibile consultare due diversi livelli di aggregazione:

1. livello di massima aggregazione relativo ai valori medi ed estremi stagionali
2. livello più disaggregato, con valori medi per Situazioni Tipo Climatiche e Tipologie di Ondata di Calore

Il livello 2 è consigliato ad utenti più esperti di climatologia.

LIVELLO 1 (MASSIMA AGGREGAZIONE): medie ed estremi stagionali

- media e massima ONDATA DI CALORE 11:00
- media e massima ONDATA DI CALORE 22:00
- media e massima ESTATE UHI 22:00
- media e minima INVERNO UHI 11:00
- media e minima INVERNO UHI 22:00

LIVELLO 2 (LIVELLO Più DISAGGREGATO): medie per STC e per tipologia di ondata di calore

- ESTATE UHI Centro 22:00
- ESTATE UHI Est 22:00
- ESTATE UHI Nord-Ovest 22:00
- INVERNO UHI Centro 11:00
- INVERNO UHI Nord-Est 11:00
- INVERNO UHI Ovest 11:00
- INVERNO UHI Centro 22:00
- INVERNO UHI Est 22:00
- ONDATA CALORE Centro 11:00
- ONDATA CALORE Nord-Est 11:00
- ONDATA CALORE Nord-Ovest 11:00
- ONDATA CALORE Centro 22:00
- ONDATA CALORE Nord-Est 22:00
- ONDATA CALORE Nord-Ovest 22:00

Per ogni tipologia di mappa, in entrambi i livelli, è possibile consultare e scaricare le corrispettive **mappe di incertezza**.

Dal punto di vista territoriale l'Atlante è interrogabile per:

- singolo comune
- singola provincia
- intero bacino aerologico

Le mappe possono essere scaricate, con riferimento al dettaglio temporale di cui sopra, nei seguenti formati:

- Immagine raster (jpeg)
- Layer vettoriale (ESRI Shp)

5.4 Il Catalogo delle Precipitazioni

Anche i fenomeni precipitativi stanno cambiando molto rapidamente: sono sempre più frequenti eventi di breve durata ma intensi e alternati a lunghi periodi di assenza di precipitazioni. Questi cambiamenti del regime pluviometrico si aggiungono, inoltre, alle già significative differenze nella distribuzione spaziale delle precipitazioni sul territorio milanese, legate anche alla stagionalità. Di tali cambiamenti e di tali differenze deve tener conto chi si occupa di progettazione di opere idrauliche e gestione del runoff urbano.

Il Catalogo delle Precipitazioni nasce proprio con lo scopo di fornire una caratterizzazione spaziale e temporale del regime delle precipitazioni nel bacino aerologico milanese nell'ultimo decennio, con particolare attenzione agli eventi estremi e alle piogge intense di breve durata.

Dalla Home Page del Catalogo delle Precipitazioni è possibile scaricare, selezionando una o più stazioni di interesse (è prevista la scelta multipla):

- gli **Indicatori climatici** (includere le “**variazioni**” per la sola stazione di Milano Centro), selezionando la relativa voce dal menù a tendina
- le **Linee Segnalatrici di Possibilità Pluviometrica (LSPP)** per 4 differenti tempi di ritorno,

I dati richiesti vengono forniti in formato CSV direttamente in download.

Seleziona le stazioni

Arconate ARPA
Busto Arsizio Accam ARPA
Busto Arsizio via Rossini ARPA
Cinisello Balsamo FOMD
Corsico ARPA
Cusano Milanino MM
Gaggiano FOMD
Lacchiarella FOMD
Landriano ARPA
Legnano FOMD

Seleziona le tipologie di dati

Indicatori
LSPP

Scarica i dati

Figura 5.24 Schermata di selezione del Catalogo delle Precipitazioni

5.4.1 Le stazioni di misura

Nel Catalogo sono incluse 46 stazioni pluviometriche presenti nell'area (Fig. 5.25), appartenenti a 3 diverse reti di monitoraggio:

- 18 stazioni della rete di Fondazione OMD (FOMD)
- 16 stazioni della rete di Metropolitana Milanese (MM), stakeholder del Progetto
- 12 stazioni della rete di ARPA Lombardia (ARPA), stakeholder del Progetto

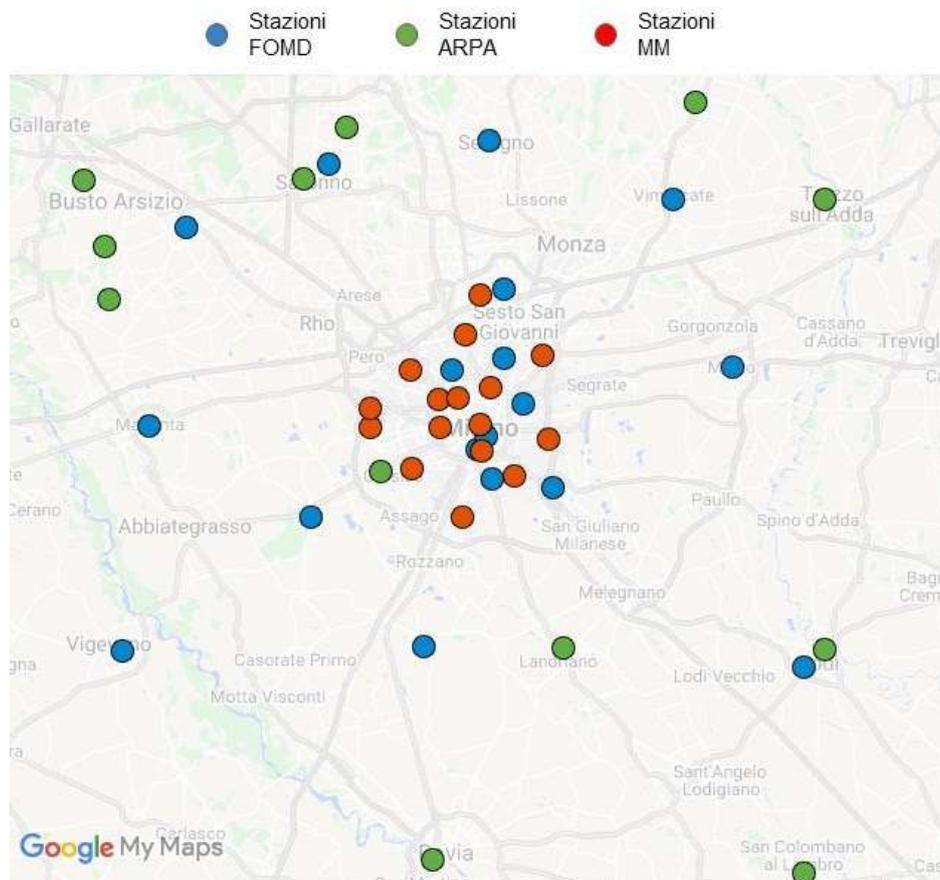


Figura 5.25 Le stazioni pluviometriche presenti nel Catalogo delle Precipitazioni

Per ogni stazione interrogata il Catalogo, oltre agli indicatori pluviometrici, fornisce i metadata: coordinate, altitudine e tipologia di pluviometro (a bascula o a impatto). La rete di Fondazione OMD è stata ampiamente descritta nel paragrafo 5.2.3. Metropolitana Milanese si occupa della gestione del servizio idrico della città di Milano e a questo scopo ha una propria rete di pluviometri, siti tutti in Milano città ad eccezione di quello in Cusano Milanino. I pluviometri di Arpa Lombardia sono stati invece selezionati tra quelli disponibili sia sulla base della collocazione nell'area sia considerando la lunghezza della serie dati e la continuità di acquisizione.

5.4.2 Gli Indicatori pluviometrici

Gli indicatori pluviometrici sono stati selezionati in seguito a numerosi confronti con esperti e professionisti del settore, allo scopo di fornire dati utili alla progettazione.

Il periodo di riferimento è lo stesso degli indicatori del Database Climatologico, ovvero dicembre 2012 - novembre 2020, assicurando la migliore confrontabilità possibile tra stazioni e grandezze fisiche diverse.

Il Catalogo contiene **26 indicatori pluviometrici** derivati dai seguenti parametri:

- **cumulati di precipitazione** (o altezze), misurati in millimetri
- **intensità di pioggia**, cioè la quantità di acqua precipitata nell'unità di tempo, misurata in mm/h
- **durata dell'evento**, misurata in minuti con riferimento a 35 stazioni del bacino aerologico milanese esteso e 3 dettagli temporali (mensile, stagionale, annuale)

Box 7. INDICATORI CLIMATICI DEL CATALOGO DELLE PRECIPITAZIONI

Cumulato medio (mm)

Cumulato mediana (mm)

Massimo cumulato giornaliero (mm)

Intensità media - evento di 10 minuti (mm/h)

Intensità massima - evento di 10 minuti (mm/h)

Intensità massima assoluta istantanea (mm/h)

Giorni di pioggia (n° medio)

Massimo numero giorni di pioggia consecutivi (n°)

Durata precipitazioni 25-esimo percentile (min)

Durata precipitazioni 50-esimo percentile (min)

Durata precipitazioni 75-esimo percentile (min)

Durata precipitazioni 95-esimo percentile (min)

Durata precipitazioni 99-esimo percentile (min)

Assenza precipitazioni 25-esimo percentile (min)

Assenza precipitazioni 50-esimo percentile (min)

Assenza precipitazioni 75-esimo percentile (min)

Assenza precipitazioni 95-esimo percentile (min)

Assenza precipitazioni 99-esimo percentile (min)

Intensità precipitazioni 25-esimo percentile (mm/h)

Intensità precipitazioni 50-esimo percentile (mm/h)

Intensità precipitazioni 75-esimo percentile (mm/h)

Intensità precipitazioni 95-esimo percentile (mm/h)

Intensità precipitazioni 99-esimo percentile (mm/h)

Eventi con Precipitazioni ≥ 5 mm in 10 minuti (n° medio di accadimenti)

Eventi con Precipitazioni ≥ 15 mm in 30 minuti (n° medio di accadimenti)

Eventi con Precipitazioni ≥ 30 mm in 60 minuti (n° medio di accadimenti)
Variazione dei cumulati (solo Milano Centro)
Variazione delle intensità (solo Milano Centro)
Variazione dei giorni di pioggia (solo Milano Centro)

NOTA: si consulti l'appendice D.3 per le metodologie di calcolo degli indicatori pluviometrici

La base dati di partenza è molto dettagliata: dati elementari di 10 minuti per tutte le stazioni. Fanno eccezione le sole Trezzo sull'Adda, Busto Arsizio ACCAM e Saronno della rete ARPA, con dati di campionamento superiori a 10 minuti: per tali stazioni è di conseguenza disponibile un numero ridotto di indicatori.

La conoscenza dei metadata di stazione, in particolar modo di latitudine e longitudine, permette la rappresentazione su mappa degli indicatori e una loro analisi di tipo spaziale sull'intero dominio. La Figura 5.26 riporta la **distribuzione spaziale dei cumulati estivi di precipitazione**: è possibile osservare come nel trimestre estivo delle precipitazioni di tipo convettivo (par. 3.3) tendano ad essere più abbondanti nella zona nord-orientale del bacino, mentre i valori più bassi di cumulo si hanno in corrispondenza delle stazioni meridionali. Differenze di cumulo si notano anche all'interno della stessa città di Milano, con i valori più elevati registrati dalle stazioni site nella parte settentrionale della città.

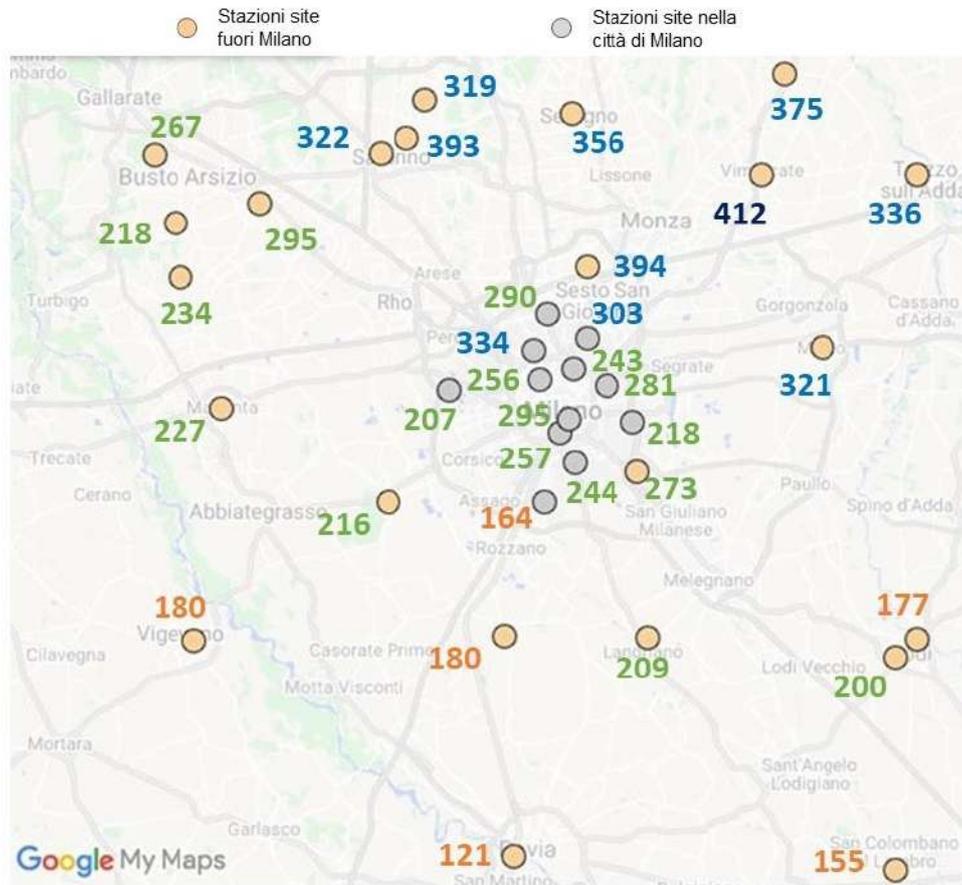


Figura 5.26 Precipitazioni cumulate medie (mm) per la stagione estiva
(Catalogo delle Precipitazioni ClimaMi)

Nella Figura 5.27 è invece rappresentato il numero medio annuo di episodi che registrano un cumulo di almeno 15 millimetri in mezz'ora, catalogabili tra gli episodi brevi ma intensi. Anche in questo caso risulta evidente come gli episodi intensi siano più frequenti sui settori settentrionali del bacino, mentre tendono a diminuire nettamente spostandosi verso sud-ovest.

5.4.3 Le Linee Segnalatrici di Probabilità Pluviometrica (LSPP)

Le Linee Segnalatrici o Curve di Probabilità Pluviometrica (LSPP) esprimono la relazione tra le altezze massime e le durate di pioggia che si possono verificare in un determinato luogo, per un assegnato valore di Tempo di Ritorno. Queste informazioni sono fondamentali per la realizzazione di opere idrauliche strettamente connesse agli eventi meteorici. Nell'impiego delle LSPP è fondamentale tenere presente sia come varia la distribuzione delle piogge sul territorio, in particolare in presenza di fenomeni temporaleschi, sia come il cambiamento climatico abbia comportato, negli ultimi anni, una variazione del regime pluviometrico: fenomeni classificati con tempi di ritorno molto lunghi tendono ora a verificarsi con maggiore frequenza, anche più volte in uno stesso anno.

Dal Catalogo delle Precipitazioni è possibile scaricare, per 44 delle stazioni considerate dal Progetto ClimaMi:

- **le LSPP ovvero i parametri di Fit a, b, c della curva di distribuzione delle probabilità Gumbel impiegata per i tempi di ritorno di 2, 5, 10 e 20 anni;** il parametro a è accompagnato anche dalla relativa incertezza $\pm\sigma (a)$
- **i massimi di precipitazione per ogni anno e con differenti risoluzioni temporali, dai 10 minuti alle 24 ore**

Per il calcolo delle LSPP sono stati utilizzati, per ogni stazione, tutti i dati disponibili a partire da rilevamenti con dettaglio di 10 minuti, in quanto **la stima della probabilità è tanto migliore quanto più lunga la serie di dati**. Di conseguenza le serie pluviometriche utilizzate per la realizzazione del Catalogo hanno lunghezze diverse tra loro: le più lunghe sono quelle delle stazioni di Milano Monviso MM (dal 1971) e Milano Centro FOMD (dal 1998).

Per maggiori dettagli sulla procedura di calcolo delle LSPP si faccia riferimento all'Appendice D.4. Nelle figure 5.28 e 5.29 è possibile osservare le LSPP relative a 4 tempi di ritorno ottenute per le stazioni di Lodi FOMD e Milano Sondrio MM. Nel grafico vengono riportati anche i massimi misurati di altezza di precipitazione relativi a varie durate evento. La curva di probabilità relativa a 20 anni è rappresentata in tratteggio in quanto "estrapolata" da serie pluriennali di dati di lunghezza inferiore a 20 anni.

Nonostante siano state elaborate per l'intervallo che va dai 10 minuti alle 24 ore (1440 minuti), **le LSPP all'interno del Progetto ClimaMi sono da considerarsi utili soprattutto per fornire informazioni sulle durate e sui fenomeni pluviometrici sub-orari**, ovvero gli eventi che si stanno maggiormente intensificando negli ultimi anni e che stanno mettendo in crisi le reti di drenaggio meteorico urbano.

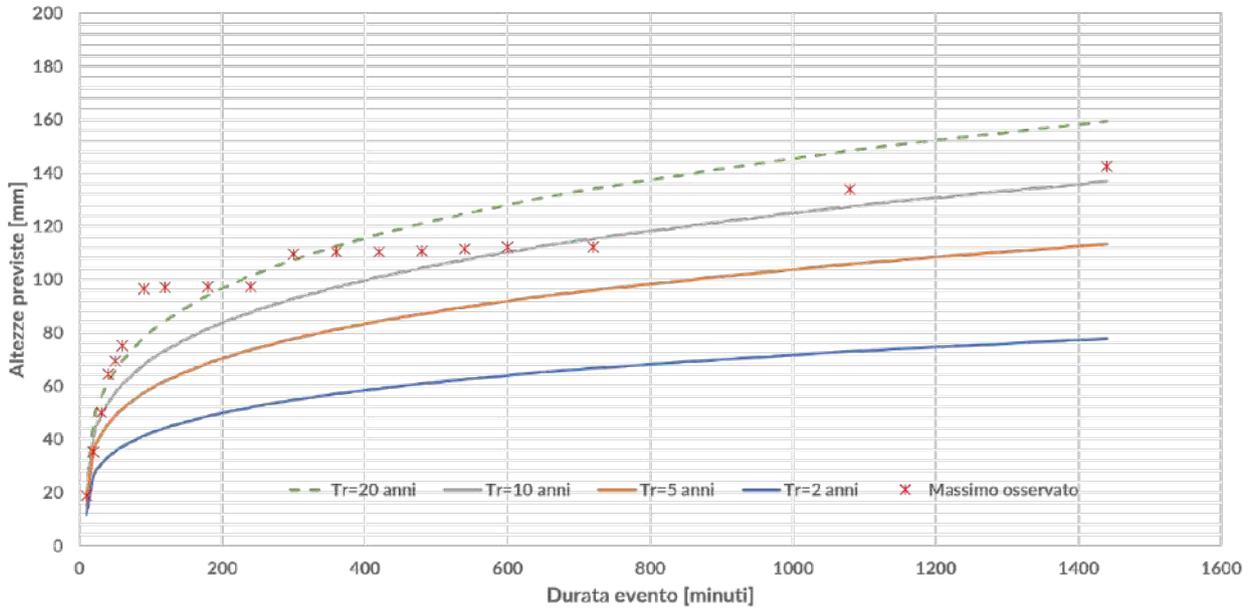


Figura 5.28 LSPP per la stazione di Lodi via Tortini FOMD relativa a 4 tempi di ritorno

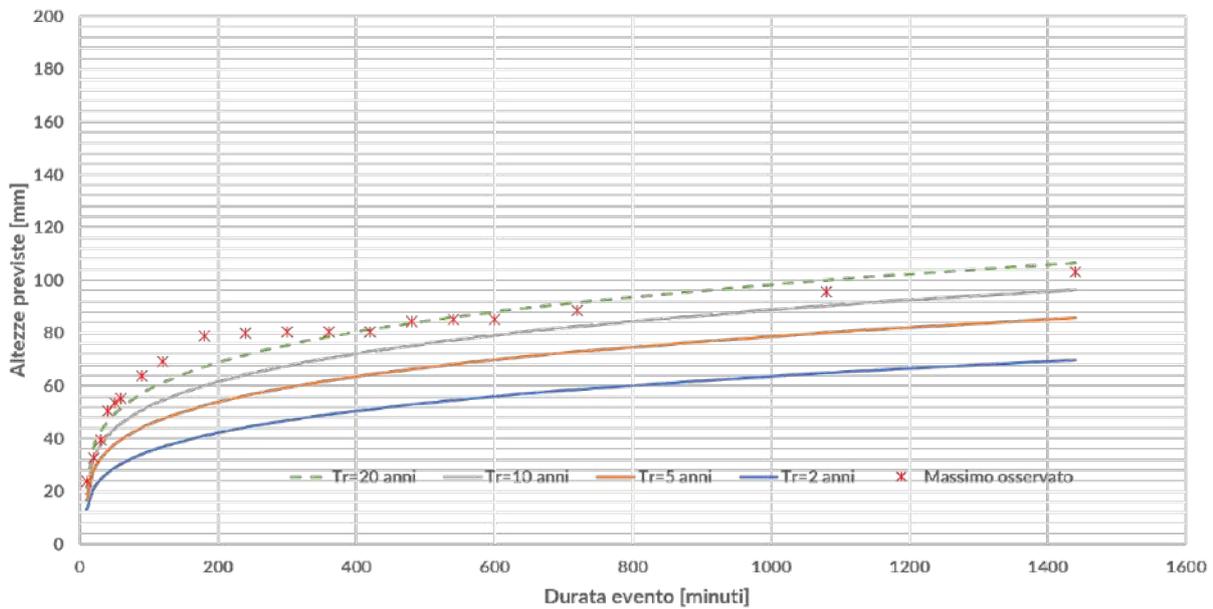


Figura 5.29 LSPP per la stazione di Milano Sondrio MM relativa a 4 tempi di ritorno



6. GESTIONE DEGLI INDICATORI

6.1 Caratteristiche qualitative degli indicatori ClimaMi

Gli indicatori devono rispondere ad una serie di requisiti che è necessario specificare in dettaglio per definire il loro livello qualitativo e i limiti applicativi.

Le variabili meteorologiche misurate dalla **rete meteo di Fondazione OMD** rispondono ai requisiti delle ECV (Essential Climatic Variables) posti dal WMO. Questa rispondenza viene ottenuta sia da una opportuna fase progettuale e/o valutativa della rete di rilevamento sia da corrette operazioni di gestione operativa, tanto più importanti e meno definite in letteratura in quanto relative al complesso contesto urbano.

I principali requisiti che si è ritenuto di dover imporre alla rete e alle sue misure sono:

- **l'omogeneità dei sensori** per tipologia, posizionamento ed esposizione, manutenzione e calibrazione, validazione;
- **la riferibilità diretta agli standard** primari e secondari di elevata qualità con procedure tracciabili (in particolare per la temperatura).

L'**omogeneità** è ottenuta con:

- l'uso di strumentazione identica in tutte le stazioni, ovvero stazioni automatiche compatte WXT520-530 prodotte da Vaisala, che rappresentano un buon compromesso tra sostenibilità di gestione e qualità/completezza delle misure (alcuni esempi in Fig. 6.1);
- il posizionamento nella medesima porzione dello strato limite urbano (Urban Canopy Layer UCL): nel caso della Rete le stazioni sono ubicate alla sommità dell'UCL, con posizionamento sul tetto o su terrazze sommitali di edifici (Fig. 6.1) all'interno di aree urbane il più possibile omogenee per caratteristiche morfologiche (unica eccezione Saronno, posta su un prato comunque all'interno di un'area urbanizzata); in questo modo si evitano i condizionamenti eccessivamente localizzati che si avrebbero a livello strada (ovvero nel Canopy) e si ottiene una buona rappresentazione dell'atmosfera urbana con un numero contenuto di punti di misura (par. 4.3);



Fig. 6.1. Alcune stazioni meteo della rete di Fondazione OMD

- l'omogenea esposizione dei sensori a microscala, tesa a minimizzare effetti locali anche non evidenti, ma che possono influenzare sensibilmente le misure istantanee e riflettersi nelle medie; ad esempio: correnti ascendenti nelle ore di soleggiamento lungo pareti verticali esposte a sud, disturbi locali della circolazione, della precipitazione o della radiazione dovute ad ostacoli di varia natura anche non nelle immediate vicinanze, diversa albedo della superficie sottostante (Fig. 6.1);
- gli stessi criteri e metodiche di validazione, eseguita in fasi successive: le prime di tipo automatico, l'ultima soggettiva da parte di personale esperto;
- le stesse procedure di manutenzione periodica, taratura e controllo dei sensori.

La **riferibilità**, che attesta e garantisce la costanza nel tempo del valore qualitativo delle misure e di conseguenza la loro idoneità all'uso in senso climatologico e non di puro monitoraggio meteorologico, viene ottenuta da precise e documentate procedure di taratura periodica tramite standard primari e secondari, questi ultimi calibrati presso qualificati istituti metrologici nazionali o internazionali (nel caso della temperatura) o per confronto con strumenti diversi (mancando attualmente gli standard).

La taratura viene effettuata periodicamente in camera climatica di Fondazione OMD per la temperatura e l'umidità, tenendo traccia dei coefficienti correttivi e del numero seriale dello strumento, mentre per ogni stazione è registrato quale strumento è stato in opera e per quale periodo (Fig. 6.2). Ciò rende possibile ogni verifica ed eventuali correzioni a posteriori. Inoltre, in tutte le stazioni è presente un secondo sensore di temperatura di tipo standard (PT100): la ridondanza consente ulteriori controlli sia in senso operativo e gestionale che in sede di validazione e analisi.

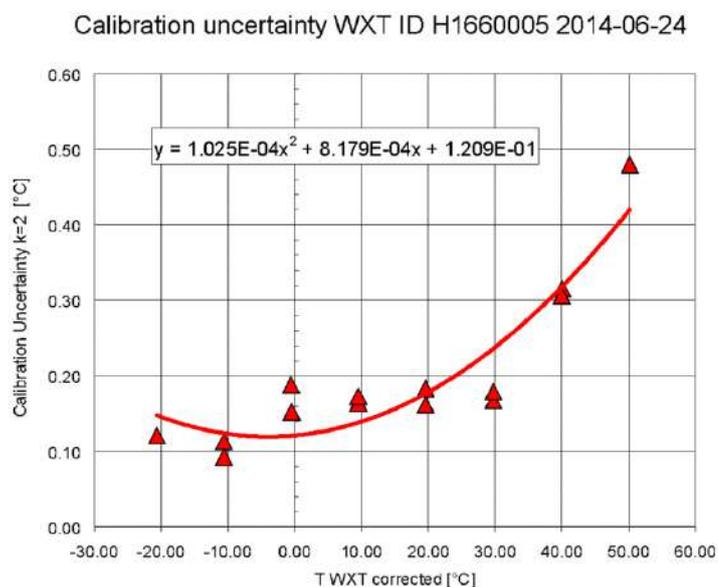


Fig. 6.2. Risultati della taratura dei sensori per la temperatura dell'aria

La precipitazione è controllata operativamente e a posteriori tramite sensori di diversa tipologia collocati in alcune stazioni, mentre le misure relative al vento vengono validate solo per confronto con le stazioni vicine e in sede di analisi: in ambedue i casi essendo una loro periodica taratura poco compatibile con i criteri di sostenibilità prefissati per la rete (la tipologia del sensore del vento, sonico biassiale e pertanto privo di parti meccaniche in movimento, lo rende molto affidabile nel tempo non richiedendo di fatto manutenzione).

La radiazione viene invece controllata attraverso il confronto periodico dello strumento a campo con uno strumento primario di qualità sottoposto a taratura riferibile agli standard internazionali. Per i dati utilizzati nel Database si è fatto uso di un solo radiometro che si identifica con il primario suddetto.

Per altre reti meteorologiche di misura, impiegate nel Progetto ClimaMi (ARPA Lombardia, MM, Meteonetwork), è necessario fare riferimento ai metadati di rete dei gestori.

6.2 Problemi legati alla misura in aria ambiente

Come ogni misura fisica, nonostante le procedure suddette, anche le misure meteorologiche sono caratterizzate da errori sistematici e casuali. I primi vengono minimizzati con le procedure di taratura e manutenzione periodica, i secondi possono essere stimati a posteriori con analisi

statistiche comparate delle serie di dati. In ogni caso **ad ogni misura corrisponde un'incertezza di misura** che va espressa secondo le prescrizioni della metrologia applicata alla meteorologia⁴². In particolare, si deve tener conto **dell'incertezza totale** o **incertezza estesa**, che deriva da diverse fonti:

- **incertezza strumentale**, dichiarata dal costruttore;
- **incertezza di taratura**, ottenuta da un'opportuna procedura in laboratorio;
- **incertezza di misura a campo**, quest'ultima a sua volta dovuta all'effettiva esposizione dei sensori in relazione all'influenza, sull'oggetto della misurazione, dell'edificio circostante in termini di flussi di calore generati e di interferenza con il soleggiamento (Fig. 6.3) e di ostacolo;



Fig. 6.3 Influenze ambientali da localizzazione ed esposizione dei sensori nella misura meteo in ambiente urbano - stazione di test di Fondazione OMD (Milano Sempione) -

6.3 Errore, propagazione dell'errore, livelli di confidenza, incertezza e conseguenze

Le incertezze sulle misure di base, escludendo gli **errori sistematici (bias)** facilmente riscontrabili ed eliminabili, sono la conseguenza degli **errori casuali di ogni misurazione**. Le incertezze complessive sono dovute alla composizione per quadratura di quelle di taratura e di quelle aggiuntive dovute all'esposizione a campo dei sensori (del misurando, di esposizione, di invecchiamento e deriva del sensore, ecc.). Nel caso della rete di Fondazione OMD vengono eseguite accurate ma dispendiose, specialmente in termini di tempo, tarature in camera climatica proprietaria per temperatura e umidità da cui è possibile avere valori quantitativi delle relative incertezze, mentre per le incertezze

⁴² Progetto METEOMET Metrologia in Meteorologia, di cui Fondazione OMD è stata un collaboratore. <https://www.meteomet.org/>

complessive a campo di tutte le variabili misurate ci si riferisce a stime ottenibili da studi comparativi e analisi ambientali oppure, in alcuni casi, estrapolando l'ordine di grandezza dell'incertezza da dati forniti dal costruttore. Nell'ambito del progetto ClimaMi le incertezze sulla temperatura sono stimate come **incertezze estese, con grado di confidenza del 95%, ovvero 2σ** :

- per le stazioni FOMD in Milano in base ai risultati di uno studio condotto precedentemente;
- per le stazioni FOMD fuori Milano per comparazione e analogia con le precedenti.

L'incertezza estesa composta sulla temperatura media è stimata essere sempre **inferiore a ± 1 °C ma superiore a $\pm 0,3$ °C** nel caso migliore, essendo quella di taratura di $\pm 0,2$ °C.

Per l'**umidità relativa** le analisi sono ancora in corso ma è possibile assicurare un **limite superiore all'incertezza dell'ordine del $\pm 10\%$** .

Per la precipitazione ed il vento le analisi dell'incertezza media sono ancora preliminari.

Nel caso del **vento**, stante la difficoltà ed onerosità della taratura che richiederebbe una galleria del vento adeguata a contenere l'intera stazione, ci si affida ai dati forniti dal costruttore che garantisce una precisione al decimo di metro al secondo per la velocità. Il vento è una variabile critica essenzialmente solo per i suoi valori massimi, che sono piuttosto rari in quanto associati a raffiche temporalesche o al passaggio di fronti particolarmente intensi. Un'approssimazione anche di molto superiore risulta accettabile pertanto nella maggior parte dei casi. Una **stima ragionevole dell'incertezza sull'intensità del vento per l'impiego operativo è dell'ordine di 0.5 m/s**. La direzione, meno critica, dipende essenzialmente dalla accuratezza in fase di installazione che risulta facilmente realizzabile e permette di stimare **un'incertezza inferiore ai $\pm 5^\circ$ in Azimut per tutte le stazioni**. Sia per l'intensità che per la direzione un corretto posizionamento dell'anemometro in area sgombra da ostacoli è essenziale.

Relativamente alla **precipitazione**, possiamo considerare **un'incertezza generale di misura dei pluviometri fino a valori dell'ordine del 20%** dovuta in parte agli effetti del vento (venti forti tendono a produrre una sottostima della misura), in parte alle condizioni di esposizione del sensore (ostacoli vicino modificano sensibilmente la qualità della misura) e in parte al fatto che reti e/o stazioni diverse possono avere sensori di diversa tipologia. Quest'ultimo fattore si presenta nel caso del progetto ClimaMi, dove per il Catalogo delle Precipitazioni sono state utilizzate tre diverse reti pluviometriche, di cui due con pluviometri a bascula (ARPA e MM) e una con sensori a impatto (FOMD). In quest'ultimo caso, tuttavia, alcune stazioni sono dotate di sensore a impatto ridondato da un classico pluviometro a bascula: è stato possibile eseguire confronti e valutazioni quantitative, da cui si ricava che **i sensori a impatto tendono a sottostimare le precipitazioni molto deboli (pioviggini)**, mentre **i sensori a bascula possono sottostimare maggiormente le precipitazioni intense in presenza di vento**. Di conseguenza i cumulati possono differire sensibilmente per il solo

fatto di essere stati ottenuti da sensori di diversa tipologia: questa differenza può raggiungere anche il 10% per stazioni diverse distribuite su un'area molto ristretta ed omogenea.

Un'ulteriore distinzione va poi fatta per le **precipitazioni solide (neve e grandine)**: i pluviometri a bascula non sono in grado di distinguere le diverse tipologie di precipitazione, mentre i sensori a impatto possono discriminare efficacemente la grandine. Pur essendo la grandine un fenomeno infrequente e comunque molto localizzato, anche questo fattore può aggiungere un ulteriore elemento d'incertezza. Anche la neve è relativamente infrequente ma, come la grandine, può determinare occasionalmente degli apporti non trascurabili. Ambedue questi elementi aggiungono incertezza sulle misure cumulate come sulle intensità.

Va infine menzionato il fatto che la calibrazione dei pluviometri (di qualunque tipo) è meno agevole di quella dei sensori termo-igrometrici e dei barometri e mancano in genere indicazioni quantitative in merito.

I suddetti valori valgono per le stazioni della Rete di Fondazione OMD.

Per le altre stazioni prese in considerazione nel progetto non si hanno dati sufficienti per una valutazione oggettiva. Considerando tuttavia che queste stazioni sono state selezionate in base a generali criteri di qualità e per confronto con la Rete di Fondazione OMD è plausibile considerare incertezze sia pur superiori ma dello stesso ordine di grandezza (Box 8).

Box 8. INCERTEZZA DELLE VARIABILI METEO-CLIMATICHE NEL PROGETTO CLIMAMI

Tipologia di stima e ordine di grandezza per rete meteorologica:

Stazioni della rete di Fondazione OMD

- incertezza estesa composta sulla temperatura media: inferiore a ± 1 °C ma superiore a $\pm 0,3$ °C
- incertezza complessiva sui valori di umidità relativa: inferiore a $\pm 10\%$
- incertezza sull'intensità del vento per l'impiego operativo: dell'ordine di 0.5 m/s
- incertezza sulla direzione del vento: inferiore a $\pm 5^\circ$ in Azimut
- incertezza sulle precipitazioni: fino a valori dell'ordine del 20% in funzione della tipologia di pioggia

Stazioni di altre reti meteorologiche

- supposte incertezze superiori a quelle delle stazioni di Fondazione OMD ma dello stesso ordine di grandezza

Una volta stimata l'incertezza associata alle misure delle variabili climatiche, si pone il problema di ottenere l'**incertezza degli indicatori derivati**.

L'incertezza degli indicatori nel Database e nel Catalogo delle **Precipitazione afferenti a medie annuali, stagionali, mensili o decadali** è pari a quella stimata per la singola misura (Box 8) divisa per la radice quadrata del numero di valori che concorrono alla media. Ad esempio, l'indicatore Temperatura Media Annuale sul periodo di 8 anni è ottenuto dalla media di misure a 10 minuti negli 8 anni e l'incertezza della media annuale sul periodo di 8 anni sarà quella stimata per la misura meteo di temperatura ($\leq 1^\circ\text{C}$) diviso la radice quadrata del prodotto '8 anni * 365 giorni * 24 ore * 6 misure ogni 10 minuti' = 420.480. Pertanto, l'incertezza del valore medio pluriennale di temperatura risulta inferiore a $\pm 0,002^\circ\text{C}$ ovvero trascurabile.

Per le altre tipologie di indicatori derivati occorre applicare la teoria della **propagazione dell'incertezza**⁴³, con semplificazioni ove possibile. Gli indicatori più articolati in tal senso sono quelli relativi all'Indice Humidex, la cui formula (rif. par. 4.2.6) contiene esplicitamente sia l'umidità relativa che la temperatura anche in espressione esponenziale: almeno nei casi in cui la temperatura è elevata⁴⁴, questa può considerarsi dominante ed assumere in prima approssimazione per l'**indice Humidex** la stessa incertezza della temperatura dell'aria.

Un altro strumento utile alla progettazione e derivato dalle misure di precipitazione è rappresentato dalle **Linee Segnalatrici di Probabilità Pluviometrica (LSPP)**. In questo caso la valutazione dell'incertezza da associare ad ogni curva per un dato tempo di ritorno è più complessa da stimare, in quanto dipendente non solo dalle misure ma anche dalla intercettazione da parte della singola stazione di episodi significativi di massima precipitazione; questa a sua volta dipende dalla lunghezza della serie di misure. Un confronto tra LSPP di stazioni vicine ed omogenee di durata più che decennale produce valori di massima precipitazione probabile che si discostano tipicamente di un 10- 15% per durate di evento di 24h e inferiori. Per stazioni, ancorché vicine ma di tipologia diversa (posizione, tipo di sensore) e lunghezza delle serie più brevi, questo scostamento può assumere valori anche fino al 20%. Le curve poi sono definite da un'interpolazione non lineare (a 3 parametri) dei dati della distribuzione dei massimi osservati calcolata con la funzione di Gumbel. Questa interpolazione ha una sua propria incertezza, che tuttavia può essere determinata quantitativamente.

In Figura 6.4 sono riportate le **LSPP di Milano Centro (serie 1998-2020)** per 4 tempi di ritorno con le relative bande d'incertezza a $\pm 1\sigma$ e $\pm 2\sigma$, essendo σ la deviazione standard calcolata dall'algoritmo di interpolazione. È evidente come questa aumenti con il tempo di ritorno e con la durata

⁴³ Un riferimento sintetico ma completo si trova online ad esempio in <http://ishtar.df.unibo.it/stat/base/error/propag.html>

⁴⁴ Attenzione: anche per valori di temperatura "bassa" (poco sopra i 20 °C) ma umidità elevata (>70%) si possono avere valori di Humidex di 6-7 °C in più rispetto alla temperatura dell'aria a riprova dell'incidenza dell'Umidità e della sua non trascurabilità (rif. Fig. 4.24, par. 4.2.6)

dell'evento: il **valore percentuale massimo dell'incertezza** nell'esempio è dell'ordine dell'**8% in corrispondenza di un tempo di ritorno T=20 anni e per durata di evento pari ad 1 giorno.**

Per una trattazione esaustiva delle questioni relative alle incertezze di misura si rimanda alle pubblicazioni di riferimento:

- *Jérôme Duvernoy: Guidance on the computation of calibration uncertainties, World Meteorological Organization WMO- IOM Report- No. 119; 2015*
- *World Meteorological Organization (WMO): Guide to Instruments and Methods of Observation, Volume V: Quality Assurance and Management of Observing Systems, 2018 Edition - Part I: Measurement of meteorological variables, 2017 Update., WMO, 2018*
- *JCGM-BIPM: Evaluation of measurement data — Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM), 2008*

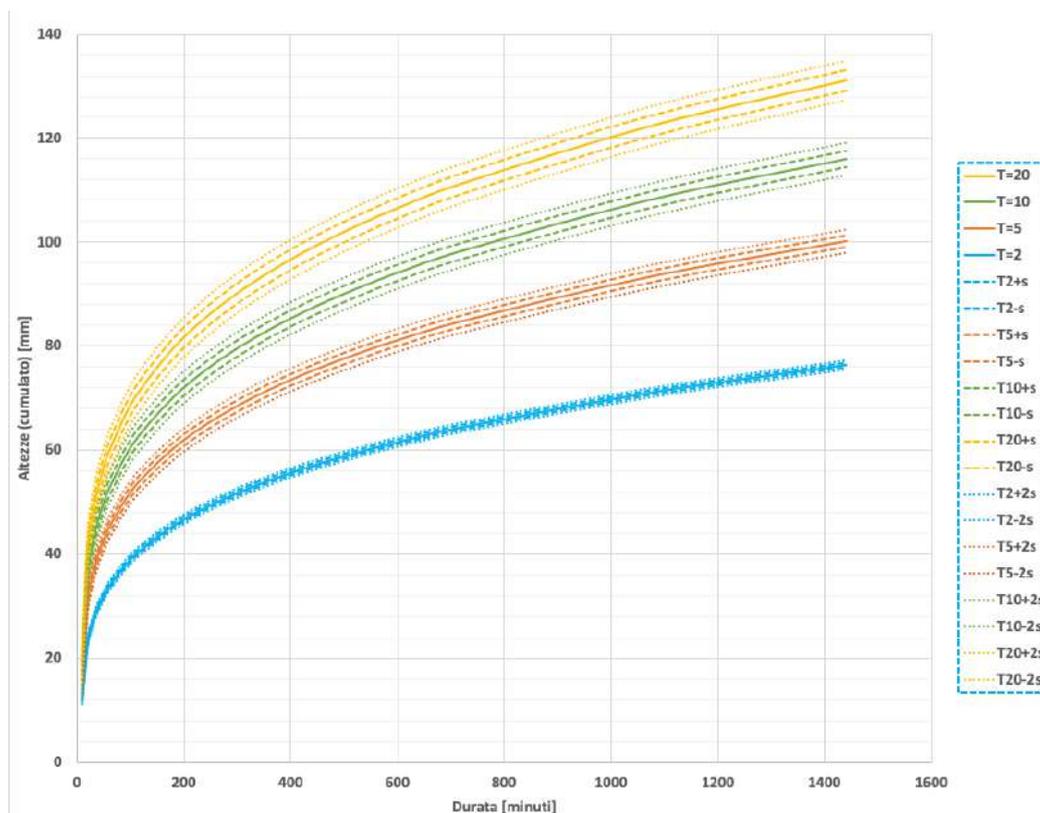


Fig. 6.4 Curve di Probabilità Pluviometrica e bande di incertezze per la stazione Milano Centro (Fondazione OMD, 1998-2020) per eventi di durata fino a 24 ore e tempi di ritorno di 2, 5, 10 e 20 anni.

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)

APPENDICE A - GLOSSARIO

Adattamento: il processo di adattamento al clima attuale o atteso e ai suoi effetti. Nei sistemi umani, l'adattamento cerca di limitare i danni o di sfruttare le opportunità favorevoli. Nei sistemi naturali, l'intervento umano può agevolare l'adattamento al clima atteso e ai suoi effetti.

Altezza pluviometrica: vedi "precipitazione cumulata".

Anno meteorologico: a differenza dell'anno solare (che inizia il 1° gennaio), si intende il periodo che va dall'1 dicembre al 30 novembre successivo.

Calibrazione: l'operazione in cui uno strumento di misura viene regolato in modo da migliorarne l'accuratezza. Tale operazione richiede il confronto con delle misure di riferimento prodotte utilizzando uno strumento campione.

Clima: l'insieme delle condizioni medie del tempo locale, regionale o globale, rispetto ad uno specifico intervallo temporale molto più lungo di quello del tempo meteorologico, data l'elevata variabilità di quest'ultimo. Secondo la definizione dell'Organizzazione Meteorologica Mondiale (WMO), il periodo di media classico è di 30 anni (CLINO).

Climatologia: disciplina che studia e definisce le condizioni medie ed estreme del tempo alle varie scale spaziali con riferimento al mese, alla stagione, all'anno del periodo pluriennale considerato.

CLINO (Climatological Normal): elaborazione statistica su base trentennale dei parametri meteorologici al suolo, che permette di descrivere le condizioni climatiche tipiche di una località, nonché, dal confronto con i dati attuali, evidenziare eventuali anomalie climatiche. Le medie riferite al periodo climatico secondo i criteri del WMO sono chiamate "valori normali" o "valori climatici".

Giorno di calura (o tropicale): giorno in cui la temperatura massima supera i 30 °C.

Giorno di gelo: giorno con temperatura minima inferiore a 0 °C.

Giorno di ghiaccio: giorno con temperatura massima inferiore a 0 °C.

Giorno di pioggia: giorno in cui il cumulato di precipitazione è di almeno 1 mm.

Grado Giorno Estivo (GGE): differenza tra l'indice Humidex e la temperatura di set point degli ambienti interni, pari a 25 °C. Vengono considerate solo le differenze positive, cioè se l'Humidex risulta essere inferiore a 25 °C, il GGE è posto automaticamente a 0 °C.

Grado Giorno Invernale (GG): differenza tra la temperatura media dell'ambiente, convenzionalmente fissata (tipicamente a 20 °C), e la temperatura media esterna giornaliera. Vengono considerate solo le differenze positive, cioè se la temperatura media esterna giornaliera è superiore alla temperatura dell'ambiente convenzionalmente fissata, il GG è posto automaticamente a 0 °C.

Humidex: indice biometeorologico ideato dai meteorologi canadesi Masterton J.M. e Richardson F.A. a partire dal 1965. Viene calcolato tramite l'utilizzo di una formula semi-empirica, utilizzando

temperatura e umidità. È applicabile per valori di temperatura superiori ai 20 °C, altrimenti coincide con la temperatura dell'aria stessa. Come altri indici biometeorologici, fornisce una stima del *discomfort* percepito dall'uomo in presenza di un clima caldo-umido.

Impatti (conseguenze, esiti): gli effetti sui sistemi naturali e umani. Nel Rapporto WGII AR5 dell'IPCC, il termine impatti è usato principalmente per riferirsi agli effetti degli eventi meteorologici e climatici estremi e dei cambiamenti climatici, sui sistemi naturali e umani. Gli impatti generalmente si riferiscono agli effetti su persone, abitazioni, salute, ecosistemi, beni e risorse economiche, sociali e culturali, servizi (inclusi quelli ambientali) e infrastrutture dovuti all'interazione dei cambiamenti climatici o degli eventi climatici pericolosi che si presentano entro uno specifico periodo di tempo, e alla vulnerabilità di una società o di un sistema esposti ai cambiamenti climatici stessi.

Ci si riferisce inoltre agli impatti come a conseguenze ed esiti. Gli impatti dei cambiamenti climatici sui sistemi geofisici, compresi alluvioni, siccità e innalzamento del livello del mare, rappresentano un sottoinsieme di impatti denominati impatti fisici.

Indicatore: qualcosa che indica, misura o fornisce in altro modo una panoramica sintetica di un concetto specifico. Un insieme di indicatori combinati viene definito indice; una variabile che tiene conto di un certo numero di valori (statistici) o di classi (qualitative) secondo le circostanze (temporali, spaziali). I valori o le classi degli indicatori, nella maggioranza dei casi, risultano da analisi e trattamento di dati di base.

Indicatore climatico: parametro derivante da una o più variabili meteorologiche fondamentali, il cui scopo è descrivere gli aspetti climatologici applicativi di una certa zona, avente determinati requisiti di qualità, continuità temporale e confrontabilità.

Intensità di precipitazione: misurata in mm/h, indica quanta pioggia verrebbe cumulata se continuasse a piovere per un'intera ora con la medesima intensità.

Isola di calore urbana (UHI): fenomeno microclimatico tipico delle aree metropolitane che consiste in un significativo aumento della temperatura in ambiente urbano rispetto alla periferia della città e alle aree rurali circostanti. Esso si verifica in particolari situazioni sinottiche (prevalentemente in situazioni di alta pressione) e specialmente nelle ore serali e notturne.

Land Surface Temperature (LST): temperatura delle superfici (da non confondersi con la temperatura dell'aria) ottenuta da misure in telerilevamento dallo spazio nei canali dell'infrarosso termico

Linee segnalatrici di possibilità pluviometrica (LSPP): curve che esprimono la relazione tra le altezze massime probabili e le durate di pioggia che si possono verificare in una determinata zona, per un assegnato tempo di ritorno.

Local Climate Zone (LCZ): classificazione in zone climatiche dell'area urbana, basata principalmente su: proprietà della struttura superficiale (altezza degli edifici, presenza di alberi), Sky View Factor, frazione di superficie edificata, albedo.

Metadata: informazioni che descrivono un insieme di dati. Nel caso di dati meteorologici, ad esempio, si tratta di tutte quelle informazioni riguardanti le coordinate della stazione, il posizionamento, la strumentazione installata.

Meteorologia: scienza del ramo della fisica che studia i fenomeni che avvengono nell'atmosfera e le leggi che li governano.

Mitigazione (del cambiamento climatico): qualsiasi intervento umano che riduca le fonti (sources) di rilascio, rafforzi e potenzi le fonti di assorbimento (sinks) dei gas serra.

Notte tropicale: notte con temperatura minima superiore ai 20 °C

Ondata di calore: periodo di almeno due giorni consecutivi in cui le temperature minime e massime superano il 95-esimo percentile di un determinato dataset di riferimento; nel presente progetto, i 95-esimi percentili sono stati calcolati per i mesi estivi (giugno-luglio-agosto) del trentennio 1961-1990 (risultando rispettivamente 23.2 °C e 33.1 °C).

Precipitazione cumulata: il quantitativo di pioggia misurata, in millimetri (o in litri/m²), in un determinato intervallo di tempo; corrisponde alla terminologia "altezza di pioggia", o "altezza pluviometrica", utilizzata nel settore idraulico.

Raffica: improvviso aumento o rapida variazione della velocità del vento, generalmente di breve durata e spesso associata ad altri fenomeni (ad esempio temporali).

Resilienza: la capacità di un sistema sociale, economico o naturale di far fronte a un evento pericoloso, o ad anomalie, reagendo o riorganizzandosi in modi che ne preservano le sue funzioni essenziali, l'identità e la struttura, mantenendo tuttavia anche le capacità di adattamento, apprendimento e trasformazione.

Riferibilità: la proprietà di una misura di essere rapportata con valori noti a campioni appropriati, attraverso una catena ininterrotta di confronti, Viene acquisita attraverso l'operazione di taratura. Durante la taratura le letture dello strumento in esame vengono messe in relazione con un campione che già dispone di una sua riferibilità all'appropriata unità di misura. La strumentazione che viene tarata presso i laboratori metrologici (laboratori accreditati) acquisisce la capacità di fare misure riferibili, e per questo spesso viene chiamata strumentazione dotata di riferibilità (o "strumentazione con riferibilità"). In Italia l'INRiM, l'Istituto Nazionale di Ricerca Metrologica, permette la riferibilità di ogni misura al Sistema Internazionale.

Rischio (Risk): le potenziali conseguenze laddove sia in gioco qualcosa di valore per l'uomo (inclusi gli stessi esseri umani) o per i sistemi naturali e laddove l'esito sia incerto. Il rischio è spesso

rappresentato come la probabilità del verificarsi di eventi o trend pericolosi, moltiplicata per le conseguenze che si avrebbero se questi eventi si verificassero. Le conseguenze vengono valutate in funzione della vulnerabilità, del grado di esposizione e della resilienza intrinseca di un sistema.

Stagione meteorologica: a differenza della stagione astronomica, essa ha inizio il primo giorno del mese in cui cade il solstizio o l'equinozio, mantenendo immutata la durata di tre mesi; ad esempio, il trimestre giugno-luglio-agosto, rappresenta l'estate meteorologica. L'utilizzo delle stagioni meteorologiche è una convenzione, che rappresenta però al meglio le caratteristiche stagionali delle medie latitudini.

Stagione termica invernale: periodo di accensione dei riscaldamenti, definita dal DPR 412/93; per Milano e il bacino aerologico milanese il periodo in questione va dal 15 ottobre al 15 aprile.

Taratura: è una tipologia di caratterizzazione che ha come scopo la definizione delle caratteristiche metrologiche di uno strumento di misura. Questo avviene tramite un confronto di misure con uno strumento di riferimento, definito campione. Con la taratura si definiscono le caratteristiche metrologiche di uno strumento di misura, la relazione di taratura e l'incertezza di misura.

Temperatura esterna estiva di progetto: temperatura utilizzata per il dimensionamento degli impianti tecnici per la climatizzazione estiva, corrispondente alla media delle temperature massime giornaliere nel periodo estivo.

Temperatura esterna invernale di progetto: la temperatura a cui nei mesi di dicembre-gennaio-febbraio, o comunque nella stagione invernale, corrisponde una frequenza cumulata del 99% per gli edifici con involucro leggero e del 97,5% per gli edifici con involucro pesante o normale, dove per "frequenza cumulata" s'intende la percentuale dei valori orari di temperatura che risultano superiori ad un determinato limite (i.e. solo l'1% o il 2.5% delle temperature medie orarie, nei due rispettivi casi, è inferiore alla temperatura esterna invernale di progetto).

Tempo di ritorno: tempo medio in cui un valore di altezza di precipitazione viene uguagliato o superato almeno una volta.

Tempo meteorologico: definito come l'insieme delle condizioni atmosferiche in un certo istante temporale su un dato territorio.

Urban Canopy Layer (UCL): si intende quello strato di atmosfera che va dalla superficie alla sommità degli edifici; all'interno dell'UCL il clima è fortemente influenzato dalle proprietà termiche della superficie e degli edifici, nonché dai flussi su scala locale dovuti alla geometria dei fabbricati e delle strade.

APPENDICE B – TAVOLA SINOTTICA DEGLI INDICATORI CLIMAMI

B.1 Tavola sinottica degli indicatori del Database di ClimaMi

L'appendice B contiene una tavola sinottica di tutti gli indicatori presenti nello Strumento Informativo Clima Urbano SI-CU.

Ciascun indicatore climatico calcolato nel periodo 2013-2020 è caratterizzato da:

- Dettaglio o passo temporale, ovvero la disponibilità del dato secondo la sua scansione temporale: decadale, mensile, stagionale o annuale; a queste si aggiungono anche stagione termica invernale (definita da DPR 412/93) e stagione termica estiva (che coincide con l'estate meteorologica)
- Settore o ambito di possibile applicazione professionale.

Elenco delle Stazioni e degli indicatori disponibili per stazione

Milano Centro CLINO 61-90	13 indicatori: <ul style="list-style-type: none"> • Temperatura media (°C) • Temperatura massima assoluta (°C) • Temperatura minima assoluta (°C) • Temperatura media delle massime giornaliere (°C) • Temperatura media delle minime giornaliere (°C) • Giorni di Gelo (Temperatura minima < 0°C) - N° medio • Giorni di Ghiaccio (Temperatura massima < 0°C) - N° medio • Giorni di Calura (Temperatura massima > 30°C) - N° medio • Notti Tropicali (Temperatura minima > 20°C) - N° medio • Giorni di Calura con Notti Tropicali (Temperatura massima > 30°C e Temperatura minima > 20°C) - N° medio • Precipitazioni cumulate media (mm) • Precipitazioni cumulate mediana (mm) • Giorni di pioggia (Precipitazioni ≥ 1 mm) - N° medio
Milano Centro CLINO 91-20	
Milano Città Studi	tutti gli indicatori (92)
Cinisello Balsamo, Gaggiano, Lacchiarella, Legnano, Lodi, Magenta, Melzo, MILANO (Bicocca, Bocconi, Bovisa, Centro, Sarpi, Sud), Rho, San Donato Milanese, Saronno, Seregno, Vigevano, Vimercate	tutti gli indicatori (88) tranne: <ul style="list-style-type: none"> • Radiazione solare globale media (W/m²) • Giorno Medio radiazione solare globale oraria (W/m²) • Radiazione solare globale massima assoluta (W/m²) • Radiazione solare globale media delle massime giornaliere (W/m²)

<p>Milano San Siro</p>	<p>Tutti gli indicatori (72) tranne:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Radiazione solare globale media (W/m²) • Giorno Medio radiazione solare globale oraria (W/m²) • Radiazione solare globale massima assoluta (W/m²) • Radiazione solare globale media delle massime giornaliere (W/m²) • Precipitazioni cumulate media (mm) • Precipitazioni cumulate mediana (mm) • Precipitazioni intensità media (mm/h) • Precipitazioni intensità mediana (mm/h) • Precipitazioni intensità massima assoluta (mm/h) • Precipitazioni intensità media delle massime assolute (mm/h) • Giorni di pioggia (Precipitazioni ≥ 1 mm) - N° medio • Giorni di pioggia consecutivi (Precipitazioni >= 1 mm) - N° massimo assoluto • Giorni senza pioggia consecutivi (Precipitazioni < 1 mm) - N° massimo assoluto • Giorni di pioggia consecutivi (Precipitazioni >= 1 mm) - N° medio • Giorni senza pioggia consecutivi (Precipitazioni < 1 mm) - N° medio • Giorni di pioggia consecutivi (Precipitazioni >= 1 mm) - distribuzione di frequenza media • Giorni senza pioggia consecutivi (Precipitazioni < 1 mm) - distribuzione di frequenza media • Eventi con Precipitazioni >= 5 mm in 10 minuti - N° medio di accadimenti • Eventi con Precipitazioni >= 15 mm in 30 minuti - N° medio di accadimenti • Eventi con Precipitazioni >= 30 mm in 60 minuti - N° medio di accadimenti
------------------------	---

INDICATORE	SETTORE APPLICATIVO					DETTAGLIO TEMPORALE						
	Progettazione Edificio-Impianto	Energia	Gestione del deflusso meteorico	Pianificazione Territoriale	Gestione del verde	Salute e benessere	Decadale	Mensile	Stagionale	Annuale	S.T. Invernale	S.T. Estiva
Temperatura media (°C)	■	■		■	■	■	■	■	■			
Temperatura massima assoluta (°C)	■	■		■	■	■	■	■	■			
Temperatura minima assoluta (°C)	■	■		■	■	■	■	■	■			
Temperatura media delle massime giornaliere (°C)	■	■		■	■	■	■	■	■			
Temperatura media delle minime giornaliere (°C)	■	■		■	■	■	■	■	■			
Giorno Medio T oraria	■	■		■	■	■		■				
Gradi Giorno Invernali (°C) Totale medio	■	■		■				■	■	■	■	
Gradi Giorno Estivi (°C) Totale medio	■	■		■								■
Giorni di Gelo T min < 0°C – N°. medio				■	■	■	■	■	■	■		
Giorni di Gelo consecutivi T min < 0°C – N°. max assoluto				■	■	■			■	■		
Giorni di Gelo consecutivi T min < 0°C – N°. medio				■	■	■			■	■		
Giorni di Gelo consecutivi T min < 0°C - distribuzione freq. media				■	■	■			■	■		
Giorni di Ghiaccio T MAX < 0°C - N°. medio				■	■	■	■	■	■	■		
Giorni di Ghiaccio consecutivi T MAX < 0°C – N°. massimo assoluto				■	■	■			■	■		
Giorni di Ghiaccio consecutivi T MAX < 0°C – N° medio				■	■	■			■	■		
Giorni di Ghiaccio consecutivi T MAX < 0°C - distribuzione freq. media				■	■	■			■	■		
Giorni di Calura T MAX > 30°C – N° medio				■		■	■	■	■	■		
Giorni di Calura consecutivi T MAX > 30°C - N° massimo assoluto				■		■			■	■		
Giorni di Calura consecutivi T MAX > 30°C - N° medio				■		■			■	■		
Giorni di Calura consecutivi T MAX > 30°C - distribuzione freq. media				■		■			■	■		

B.2 Stazioni e indicatori del Catalogo delle Precipitazioni

Nella stessa forma del paragrafo precedente di seguito sono presentati le stazioni meteorologiche utilizzate per la realizzazione del Catalogo delle Precipitazioni e gli indicatori calcolati.

Ciascun indicatore pluviometrico è calcolato sul periodo 2013-2020 ed è caratterizzato dal dettaglio o passo temporale, ovvero la disponibilità del dato secondo la sua scansione temporale: mensile, stagionale o annuale.

Elenco delle Stazioni e degli indicatori disponibili per stazione

<p>Cinisello Balsamo, Gaggiano, Lacchiarella, Legnano, Lodi, Magenta, Melzo, MILANO (Bicocca, Bocconi, Bovisa, Città Studi, Sud), San Donato Milanese, Saronno, Seregno, Vigevano, Vimercate</p>	<p>Tutti i 26 indicatori</p>
<p>Milano Centro</p>	<p>Oltre ai 26 indicatori:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Variazione dei cumulati (mm/anno) • Variazione delle intensità (mm/h/anno) • Variazione dei giorni di pioggia (giorni/anno)
<p>Busto Arsizio ACCAM, Saronno ARPA, Trezzo sull'Adda ARPA</p>	<p>Solo i seguenti indicatori:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Cumulato medio (mm) • Cumulato mediana (mm) • Massimo cumulato giornaliero (mm) • Giorni di pioggia (n° medio) • Eventi con Precipitazioni ≥ 30 mm in 60 minuti (n° medio di accadimenti)
<p>Milano (Bruzzano, Monluè, Monviso, Quinto Romano, Ronchettino, Sondrio) Arconate, Busto Arsizio via Rossini, Landriano, Lodi via X Maggio, Misinto, Osnago, Pavia SS 35, San Colombano al Lambro</p>	<p>Tutti i 26 indicatori tranne:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Intensità massima assoluta istantanea (mm/h) • Assenza precipitazioni 25-esimo percentile (min) • Assenza precipitazioni 50-esimo percentile (min) • Assenza precipitazioni 75-esimo percentile (min) • Assenza precipitazioni 95-esimo percentile (min) • Assenza precipitazioni 99-esimo percentile (min)

Per le stazioni meteorologiche di seguito elencate, sono state calcolate le Linee Segnalatrici di Probabilità Pluviometrica (LSPP)

- Stazioni FOMD:
 - Cinisello Balsamo;
 - Gaggiano
 - Lacchiarella;
 - Legnano;
 - Lodi via Tortini
 - Magenta;
 - Melzo;
 - Milano (Bicocca, Bocconi, Bovisa, Centro, Città Studi, Sud);
 - San Donato Milanese;
 - Saronno via Larga;
 - Seregno;
 - Vigevano;
 - Vimercate.
- Stazioni ARPA:
 - Arconate;
 - Busto Arsizio via Rossini;
 - Corsico;
 - Landriano;
 - Lodi via X Maggio;
 - Misinto;
 - Osnago;
 - Pavia SS 35;
 - San Colombano al Lambro;
 - Saronno viale Santuario.
- Stazioni Metropolitana Milanese:
 - Cusano Milanino;
 - Milano (Baggio, Bruzzano, Crescenzo, Emissario Nosedo, Gattamelata, Marino, Monluè, Monviso, Pareto, Quinto Romano, Ronchettino, Ronchetto S/N, Sacco, Sondrio, Vignola).

	DETTAGLIO TEMPORALE		
	Mensile	Stagionale	Annuale
INDICATORI			
Cumulato medio (mm)			
Cumulato mediana(mm)			
Massimo cumulato giornaliero (mm)			
Intensità media (mm/h) Evento di 10 minuti			
Intensità massima (mm/h) Evento di 10 minuti			
Intensità massima assoluta istantanea (mm/h)			
Giorni di pioggia N° medio			
Massimo numero giorni di pioggia consecutivi N° medio			
Durata precipitazioni 25-esimo percentile (min)			
Durata precipitazioni 50-esimo percentile (min)			
Durata precipitazioni 75-esimo percentile (min)			
Durata precipitazioni 95-esimo percentile (min)			
Durata precipitazioni 99-esimo percentile (min)			
Assenza precipitazioni 25-esimo percentile (min)			
Assenza precipitazioni 50-esimo percentile (min)			
Assenza precipitazioni 75-esimo percentile (min)			
Assenza precipitazioni 95-esimo percentile (min)			
Assenza precipitazioni 99-esimo percentile (min)			
Intensità precipitazioni 25-esimo percentile (mm/h)			
Intensità precipitazioni 50-esimo percentile (mm/h)			
Intensità precipitazioni 75-esimo percentile (mm/h)			
Intensità precipitazioni 95-esimo percentile (mm/h)			
Intensità precipitazioni 99-esimo percentile (mm/h)			
Eventi con Precipitazioni >= 5 mm in 10 minuti (N° medio di accadimenti)			
Eventi con Precipitazioni >= 15 mm in 30 minuti (N° medio di accadimenti)			
Eventi con Precipitazioni >= 30 mm in 60 minuti (N° medio di accadimenti)			

APPENDICE C – STRUMENTI E ATTORI EUROPEI ED EXTRAEUROPEI

C.1 Strumenti e piattaforme europee ed extra-europee per l'adattamento climatico e la resilienza in ambiente urbano

C.1.1 Climate-ADAPT e l'Urban Adaptation Support Tool

L'EEA ha prodotto e gestisce, in cooperazione con la Commissione Europea (Direzione Generale CLIMA), la Piattaforma Europea per l'Adattamento Climatico Climate-ADAPT.

Climate-ADAPT ha lo scopo di rendere accessibili e condividere dati e informazioni sui cambiamenti attesi in Europa, le vulnerabilità regionali, le strategie e azioni di adattamento nazionali, transnazionali e locali, i casi studio e gli strumenti per il supporto alla pianificazione dell'adattamento. La piattaforma comprende un database di facile accessibilità che contiene tutta l'informazione verificata in materia. Inoltre, essa include diversi tool, di cui alcuni dedicati in particolar modo all'adattamento in ambiente urbano. In particolare, possiamo ricordare l'Urban Adaptation Support Tool (UAST) e l'Urban Adaptation Map Viewer.

L'Urban Adaptation Support Tool (UAST)⁴⁵ è stato sviluppato come guida pratica per le aree urbane e consta di una particolare sezione della piattaforma Climate-Adapt che raccoglie tutte le conoscenze in merito all'adattamento in ambiente urbano contenute sulla piattaforma stessa e le organizza secondo uno schema in più fasi, che ricalca a sua volta quello più generale sviluppato proprio da Climate-Adapt per l'adattamento.



Figura C.1 Logo interattivo dell'UAST nella sezione ad esso dedicata su Climate-Adapt

(fonte <https://climate-adapt.eea.europa.eu/>)

Le 6 fasi sono: 1. Preparare il terreno per l'adattamento, 2. Definire i rischi climatici e le vulnerabilità, 3. Identificare le opzioni di adattamento, 4. Identificare e selezionare le opzioni di adattamento, 5. Attuare l'adattamento, 6. Monitorare e valutare l'adattamento. Il ciclo poi si chiude, evidenziando che l'adattamento ai cambiamenti climatici è un processo iterativo. Per ogni passaggio primario, vi

⁴⁵ <https://climate-adapt.eea.europa.eu/knowledge/tools/urban-ast/step-0-0>

sono diversi passaggi secondari e ciascuno fornisce collegamenti a risorse di conoscenza specifiche. Per ogni sottofase, viene fornito un breve riepilogo del problema dato, seguito da una guida più dettagliata in "Ulteriori informazioni". Ogni sottofase fornisce collegamenti a materiali di orientamento, casi studio o strumenti specifici, tra cui:

- Casi di studio Climate-ADAPT
- Guida e strumenti rilevanti per l'adattamento
- Pubblicazioni, relazioni e altre risorse del database Climate-ADAPT
- Progetti pertinenti finanziati dall'UE
- Patto dei sindaci per le risorse climatiche ed energetiche

The screenshot shows the Climate-ADAPT website interface. At the top, there is a navigation bar with tabs for 'ABOUT', 'EU POLICY', 'COUNTRIES, TRANSNATIONAL REGIONS, CITIES', 'KNOWLEDGE', and 'NETWORKS'. Below this, a search bar and utility links are visible. The main content area is titled '5 Implementing adaptation' and contains a sub-section '5.4 Addressing climate change through adaptation and mitigation'. On the left, a vertical sidebar lists six steps of the 'Urban Adaptation Support Tool' process, with step 5 highlighted. The main text area provides an overview of the 5.4 section, including a paragraph on the integration of mitigation and adaptation, and lists several resources such as reports, guidance documents, and case studies.

Figura C.2 Sezione 5 dell'UAST (in basso i link alle risorse informative collegate alla piattaforma)

[\(https://climate-adapt.eea.europa.eu/\)](https://climate-adapt.eea.europa.eu/)

C.1.2 L'Urban Adaptation Map Viewer

L'Urban Adaptation Map Viewer⁴⁶ è a sua volta una sezione della piattaforma Climate-Adapt, concepito come un contenitore di informazioni geografiche, supportato da un sistema di visualizzazione di mappe. Lo scopo di questo visualizzatore di mappe è fornire una panoramica degli attuali e futuri pericoli per il clima che le città europee devono affrontare, la vulnerabilità delle città a questi pericoli e la loro capacità di adattamento.

Il *map viewer* raccoglie informazioni da varie fonti sulla distribuzione spaziale osservata e proiettata e sull'intensità di alte temperature, inondazioni, scarsità d'acqua e incendi selvaggi. Fornisce inoltre alcune informazioni sulle cause della vulnerabilità delle città e sull'esposizione a questi pericoli, legate alle caratteristiche delle città e della loro popolazione. Infine, fornisce informazioni sulla pianificazione dell'adattamento e sulle azioni delle città europee.

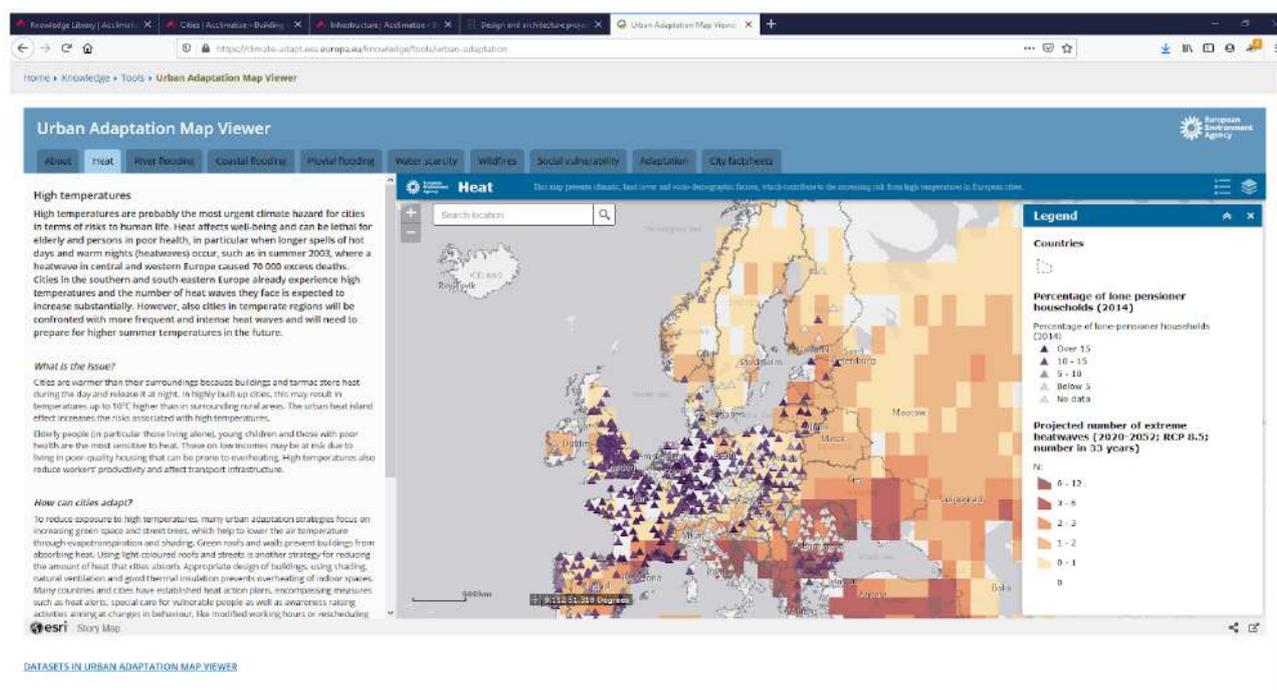


Figura C.3 Urban Adaptation Map Viewer (<https://climate-adapt.eea.europa.eu/>)

C.1.3 La Tassonomia UCAIF per gli impatti nell'azione urbana e il clima

La UCAIF (*Urban Climate Action Impacts Framework*, Documento Quadro per gli impatti nell'azione urbana per il clima) è un documento di riferimento sviluppato dalla rete C40 col supporto di *Ramboll*, una importante società di consulenza nel campo dell'ingegneria e della progettazione, con

⁴⁶ <https://climate-adapt.eea.europa.eu/knowledge/tools/urban-adaptation>

l'obiettivo di stimolare a livello globale un approccio basato su dati, misurazioni e osservazioni per l'azione di adattamento.

Una componente fondamentale di tale documento quadro è costituita da un tentativo di tassonomia per la classificazione e la definizione degli impatti del cambiamento climatico in diversi settori e da una ampia raccolta di indicatori suddivisi su più livelli.

Sebbene, la tassonomia e gli indicatori che la compongono siano pensati primariamente per definire gli effetti della crisi climatica in diversi settori e ambiti dell'ambiente urbano, essi possono risultare utili nella valutazione quali-quantitativa delle azioni di adattamento, incluse quelle derivanti dalla pianificazione e dalla progettazione da parte dei professionisti.

THEME	IMPACT GROUP	IMPACT (examples)	SPECIFIC GROUP (examples)	INDICATORS (examples)
SOCIAL	Health	Physical health	Health hazards and death	Life expectancy at birth
			Disability	Disability adjusted life years
			Physical activity	Share of time spent doing physical activity
	Mental health	Stress	Suicide rate	
		Dementia	Incidence of dementia	
	Quality of life and urban liveability	Housing	Housing affordability	Cost of rent as share of disposable income
Housing quality			Living area per household	
ECONOMIC	Wealth and economy	Economic prosperity	Economic production	Total city income (GDP)
			Labour productivity	GDP per job
		Employment	Employment figures	Unemployment rate
			Job quality	Earnings quality
		Economic innovation	Innovation	Number of patents created
			Local sector development	Number of start-ups
ENVIRONMENTAL	Environmental quality	Biodiversity	Biodiversity protection	Proportion of natural areas under protection
			Ecosystem services	Daily volume of natural freshwater extracted
		Air quality	Indoor pollution	Types of cooking fuels used
			Outdoor air pollution	Number of days above WHO pollutants recommendations
		Noise	Indoor noise	Indoor noise levels (dB)
			Outdoor noise	Noise level from traffic (dB)

Tabella C.1 Estratto esemplificativo della Tassonomia UCAIF per gli impatti del cambiamento climatico

La tassonomia UCAIF è, come indicato dagli stessi autori, un documento dinamico, destinato a raccogliere gli input degli stakeholders che vorranno utilizzarla e a crescere nel tempo, includendo e mettendo a sistema sempre più (e sempre migliori) categorie e indicatori.

Nella Tabella C.1 si riporta un esempio della tassonomia. Poiché, tramite la pianificazione e la progettazione, è possibile agire su alcuni indicatori climatici, si assume che sia altresì possibile influenzare indicatori di impatto del cambiamento climatico in diversi dei settori (*themes*) indicati e altri ancora.

C.1.4 Le Climate Resiliency Design Guidelines della Città di New York

Le Linee guida per la progettazione della resilienza climatica (*Climate Resiliency Design Guidelines*) della città di New York forniscono istruzioni passo passo su come integrare i dati storici sul clima con dati regionali sui cambiamenti climatici nella progettazione delle strutture cittadine.

Il documento sostiene l'importanza del "design resiliente", come parte integrante della pianificazione di progetto per i progettisti in ambiente urbano. L'obiettivo principale delle Linee guida è quello di incorporare dati previsionali sui cambiamenti climatici nella progettazione, integrando quindi i codici e gli standard attuali che regolano la progettazione incorporando dati meteorologici storici, per arrivare a definire nuovi standard con climatologie adeguate.

Le Linee guida della città di New York intendono quindi fornire una metodologia coerente per ingegneri, architetti, paesaggisti e progettisti per ideare strutture che siano resistenti e resilienti a condizioni climatiche mutate e incerte.

Le Linee Guida della città di New York trattano in particolare tre ambiti per il "design resiliente": l'aumento delle temperature e degli eventi di ondate di calore; l'aumento delle intensità di precipitazione; e l'aumento del livello del mare.

La tabella sottostante (Tabella C.2), per citare un esempio, è tratta dalla sezione relativa alla riduzione degli impatti da ondate di calore. Essa è intesa a fornire informazioni utili per adattare gli standard di progettazione che riducono gli impatti sui sistemi di raffreddamento delle strutture, i componenti, le strutture, i paesaggi e i materiali per gestire l'aumento delle temperature medie e l'aumento di eventi di ondate di calore.

Tabella C.2 Strutture e componenti e proiezioni climatiche associate

Proiezioni climatiche (periodo di tempo coperto)	Esempi di edifici, infrastrutture, paesaggi e componenti categorizzati per vita utile tipica	
<p>2020 (fino al 2039)</p>	<p><i>Componenti e finiture temporanee o di rapida sostituzione</i></p>	<ul style="list-style-type: none"> ● Sistemi temporanei e portatili di protezione contro le inondazioni ● Pavimentazioni di asfalto, pavimentazioni e altre finiture stradali ● Infrastrutture verdi

		<ul style="list-style-type: none"> ● Componenti di arredo urbano ● Strutture edilizie temporanee ● Strutture di stoccaggio e deposito ● Componenti tecnologici (es.: apparecchiature di telecomunicazione, batterie, pannelli fotovoltaici, celle a combustibile)
<p>2050 (2040-2069)</p>	<p><i>Miglioramenti nelle strutture e componenti con cicli di sostituzione regolari</i></p>	<ul style="list-style-type: none"> ● Componenti elettrici, meccanici e per il condizionamento (HVAC) ● (maggior parte) ristrutturazioni edilizie (miglioramenti sostanziali) ● Pavimentazione in cemento ● Componenti meccanici infrastrutturali (ad esempio, compressori, ascensori, pompe) ● Strutture ricreative all'aperto ● Apparecchiature energetiche in loco (es.: serbatoi di carburante, generatori di emergenza) ● Sistemi di ritenzione acqua piovana
<p>2080 (2070-2099)</p>	<p><i>Edifici e infrastrutture a vita utile di lungo periodo</i></p>	<ul style="list-style-type: none"> ● (maggior parte) edifici (es.: pubblici, uffici, residenziali) ● Moli, banchine e paratie ● Piazze ● Muri di sostegno ● Condotte sotterranee ● Impianti di generazione e co-generazione di energia
<p>2100+</p>	<p><i>Beni che non possono essere ricollocati</i></p>	<ul style="list-style-type: none"> ● Grandi infrastrutture (es.: gallerie, ponti, impianti di trattamento delle acque reflue) ● Edifici monumentali ● Ricostruzioni stradali ● Infrastrutture fognarie secondarie (es.: fognature, bacini di raccolta, scarichi)

Tabella C.2 Tabella esemplificativa tratta dalle Linee guida per la progettazione della resilienza climatica della Città di New York – sezione *Minimizzare gli impatti da ondate di calore*

C.2 Quadro degli attori e delle iniziative attuali

Livello Globale

Segretariato UNFCCC

Il Segretariato UNFCCC è un organo delle Nazioni Unite creato nel 1992 in occasione della Conferenza delle Nazioni Unite sull'Ambiente e lo Sviluppo a Rio de Janeiro.

Il Segretariato è l'organo di coordinamento che:

1. ha facilitato la fase di negoziazione e l'adozione del Protocollo di Kyoto nel 1997 e l'Accordo di Parigi nel 2015.
2. Organizza le sessioni di negoziati annuali nelle Conferenze delle Parti (Conference of Parties, COP).
3. Fornisce expertise tecnica e supporto per le analisi e la revisione delle informazioni sul cambiamento climatico prodotte nei vari paesi membri
4. Aggiorna il registro NDC (*Nationally Determined Contributions*), delle emissioni di gas climalteranti per paese, stabilito nell'Accordo di Parigi

UNFCCC

La *United Nations Framework Convention on Climate Change* (Convenzione Quadro sui Cambiamenti Climatici delle Nazioni Unite), è un accordo internazionale adottato a New York il 9 maggio del 1992 per far fronte alla questione del cambiamento climatico con un'azione coordinata globale

Conferenza delle Parti

La COP è l'organismo decisionale superiore nella Convenzione UNFCCC. Nelle Conferenze, gli Stati verificano l'attuazione della Convenzione e prendono le decisioni relative in merito. Inoltre, le COP revisionano le comunicazioni nazionali relative agli inventari delle emissioni di gas climalteranti.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)

L'IPCC è un organismo costituito nel 1988 da due agenzie dell'ONU, la *World Meteorological Organization* (WMO) e il *United Nations Environment Programme* (UNEP) con lo scopo di fornire ai decisori politici valutazioni regolari delle basi scientifiche del cambiamento climatico, dei suoi impatti e rischi futuri e delle opzioni per adattamento e mitigazione. L'IPCC non conduce ricerche proprie per produrre scenari climatici. Il suo ruolo è quello di valutare e mettere a sistema la letteratura scientifica tecnica e socioeconomica rilevante per la comprensione del cambiamento climatico, proveniente da tutti i paesi del mondo ed elaborare tali informazioni, per produrne raccomandazioni trasferibili e chiare.

Rapporti IPCC

L'IPCC ha come attività principale la pubblicazione di periodici rapporti sullo stato dei cambiamenti climatici.

È del 2018 il Rapporto Speciale "Global Warming of 1.5°C", finalizzato a supportare i termini dell'Accordo di Parigi che fissa l'obiettivo di riscaldamento "ben al di sotto dei 2°C". Il rapporto è focalizzato sul mettere in evidenza le conclusioni scientifiche sulle rilevanti differenze in termini di impatti tra gli scenari di riscaldamento globale a 1.5° C e 2°C.

È in fase di redazione il 6° Rapporto di Valutazione.

Commissione Europea & DG Clima

Nell'ambito della Commissione Europea, l'organo deputato alla questione climatica è la Direzione Generale per l'Azione sul Clima. Essa opera sia internamente all'Unione Europea, sia per la negoziazione e la cooperazione a livello internazionale. Le sue missioni includono:

- la formulazione e attuazione di politiche e strategie per il clima (in particolare le emissioni di gas "serra", lo strato di ozono dell'atmosfera e l'adattamento, oltre che l'integrazione dell'azione per il clima in tutte le politiche settoriali dell'UE) e per il raggiungimento degli obiettivi climatici al 2020, 2030 e oltre;
- l'attuazione del meccanismo dell'UE per il trading delle emissioni (*EU's Emissions Trading System - ETS*); il monitoraggio delle emissioni di gas climalteranti per gli Stati membri dell'Unione;
- la promozione di tecnologie low-carbon e di misure di adattamento al cambiamento climatico.

Joint Research Centre (JRC)

Questo ente costituisce un servizio di ricerca scientifica e organizzazione delle conoscenze della Commissione Europea a supporto dello sviluppo e implementazione delle politiche comunitarie. I suoi temi di ricerca comprendono l'ambiente sicuro e salutare, le fonti energetiche, la mobilità sostenibile e la salute e sicurezza dei consumatori.

Strategia di Adattamento UE (2013)

Questo documento stimolava i governi nazionali e locali a definire strategie e interventi di adattamento attraverso la concessione di finanziamenti e la pubblicazione di linee guida e a promuovere processi decisionali informati, anche attraverso il costante aggiornamento del portale *Climate-Adapt*.

Nel 2018 l'UE ha prodotto una valutazione della propria Strategia, analizzando i risultati ottenuti: 25 su 28 stati membri avevano adottato una strategia di adattamento.

Piattaforma Europea per l'Adattamento Climatico - Climate-ADAPT

L'EEA (sotto) ha prodotto e gestisce, la Piattaforma Europea per l'Adattamento Climatico *Climate-ADAPT*, che ha lo scopo di condividere dati e conoscenze sui cambiamenti climatici in Europa. La piattaforma comprende un database di facile accessibilità che contiene tutta l'informazione verificata in materia e moltissime risorse informative.

Link:

<https://climate-adapt.eea.europa.eu/>

Agenzia europea dell'ambiente (EEA: European Environment Agency)

Si tratta di un'agenzia dell'Unione europea il cui compito è fornire informazioni indipendenti e qualificate sull'ambiente ai responsabili delle decisioni politiche e al pubblico. Tali conoscenze costituiscono la base di valutazioni ambientali tematiche e integrate intese a supportare i processi di gestione ambientale, le valutazioni e le politiche ambientali nonché la partecipazione dei cittadini.

Patto dei Sindaci per il Clima e l'Energia (Covenant of Mayors for Climate and Energy)

Il Patto dei Sindaci per il Clima e l'Energia, nato nel 2008 in seno all'Unione Europea, raccoglie amministratori locali che volontariamente sostengono l'attuazione degli obiettivi dell'Unione in ambito di clima ed energia. Il coordinamento del Patto offre supporto ai membri che decidano di sviluppare il proprio Piano (PAESC) a livello di Comune o di aggregazioni e gli obiettivi di efficientamento energetico e riduzione delle emissioni (che contribuiscono alle quote nazionali nel meccanismo di contabilizzazione europea) e misure di adattamento al cambiamento climatico.

Strategia e Piano Nazionale per l'Adattamento ai Cambiamenti Climatici

L'Italia si è formalmente dotata di una **Strategia Nazionale di Adattamento ai Cambiamenti Climatici** (SNACC1) nel 2015, approvata con Decreto direttoriale del Ministero dell'Ambiente. Essa è costituita da tre parti:

1. "Rapporto sullo stato delle conoscenze scientifiche su impatti, vulnerabilità ed adattamento ai cambiamenti climatici in Italia"
2. "Analisi della normativa comunitaria e nazionale rilevante per gli impatti, la vulnerabilità e l'adattamento ai cambiamenti climatici"
3. "Elementi per una Strategia Nazionale di Adattamento ai Cambiamenti Climatici"

Il **Piano Nazionale di Adattamento ai Cambiamenti Climatici** (PNACC1) del 2017, non è invece ancora formalmente approvato dalla legge italiana. Il PNACC ha prodotto una zonazione macroclimatica dell'intero territorio nazionale e l'individuazione di aree climatiche omogenee con anomalie climatiche previste omogenee, secondo gli scenari disponibili.

Inoltre, per diversi settori e tematiche, il PNACC ha analizzato esposizione, vulnerabilità e capacità di adattamento al rischio climatico. Sulla base di tali analisi, sono state poi formulate più di 350 misure di adattamento.

Link: <https://www.minambiente.it/notizie/strategia-nazionale-di-adattamento-ai-cambiamenti-climatici-0>

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.

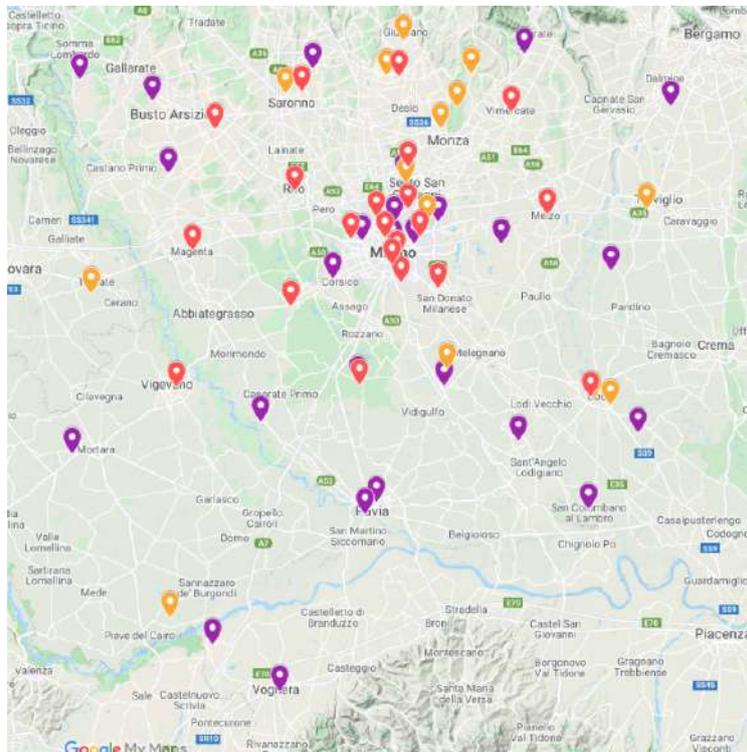


Figura D.2.1. Area e stazioni meteorologiche considerate nell'Atlante delle Temperature dell'Aria
(in rosso: Fondazione OMD, in viola: ARPA, in giallo: Meteonetwork)

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).

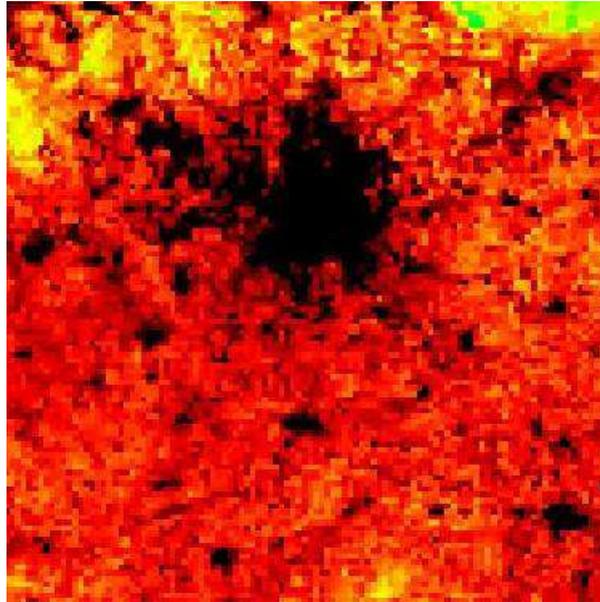


Figura D.2.2. Esempio di immagine di LST sull'area di studio

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.

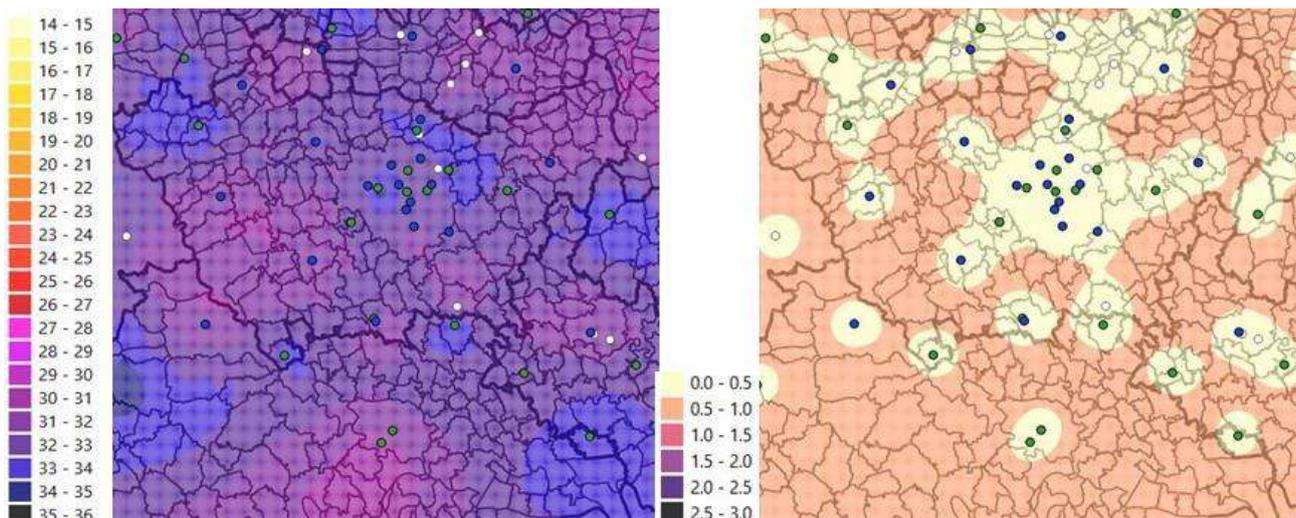


Figura D.2.3. Mappa della temperatura dell'aria (°C) e corrispondente mappa delle incertezze (°C)
(a sinistra: temperatura dell'aria; a destra: deviazione standard)

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.

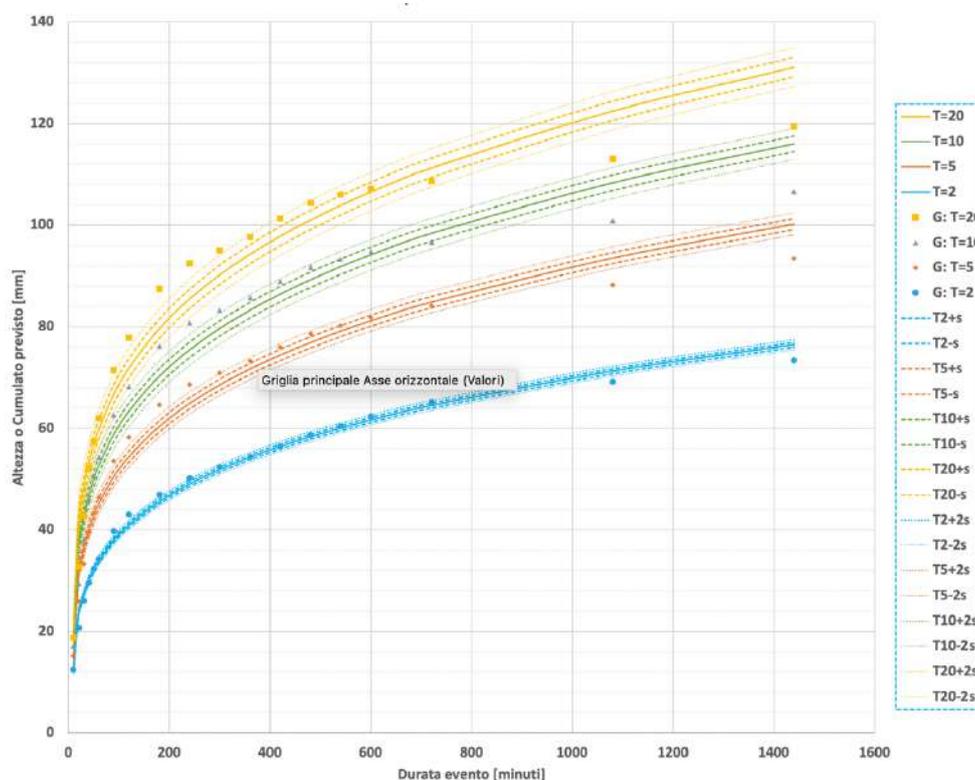


Fig. D.4.1: Curve di Probabilità Pluviometrica LSPP e bande di incertezze per la stazione Milano Centro di Fondazione OMD (1998-2020) per eventi di durata fino a 24 ore e tempi di ritorno di 2, 5, 10 e 20 anni.

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.

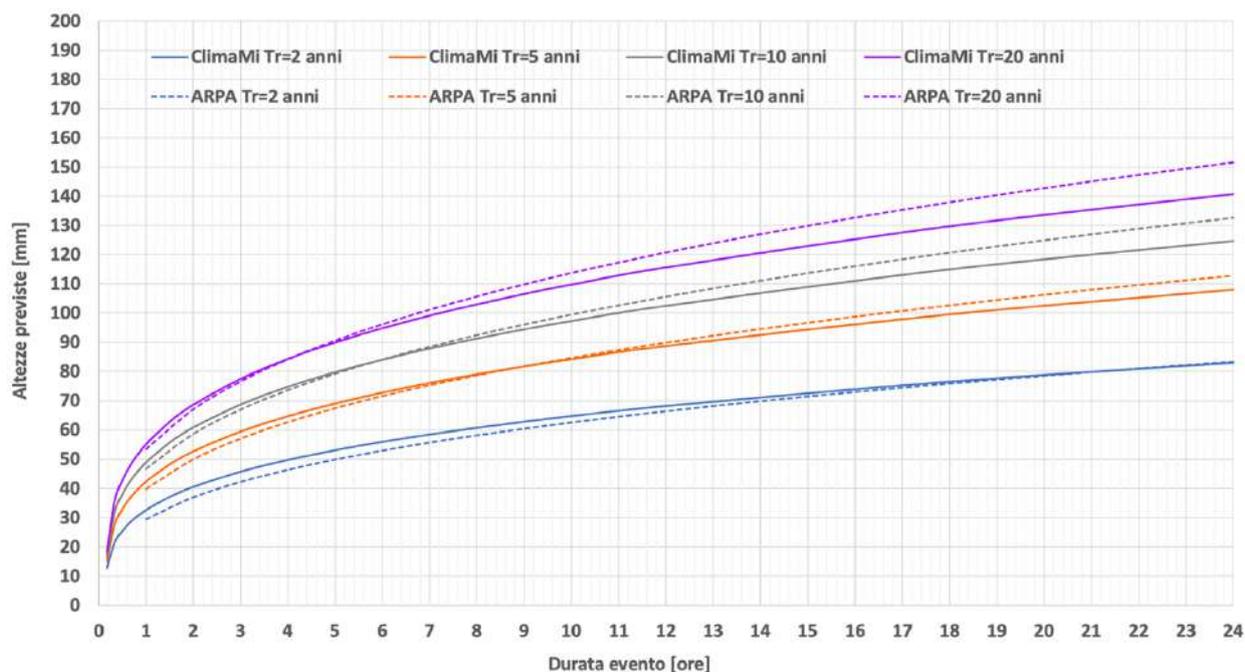


Fig. D.4.2: Confronto tra LSPP ClimaMi e LSPP ARPA Lombardia per la stazione Legnano di Fondazione OMD (parametri LSPP ARPA: $a_1=31.4$; $N=0.328$; $\alpha=0.2901$; $k=-0.0089$; $\epsilon=0.8295$)

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

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

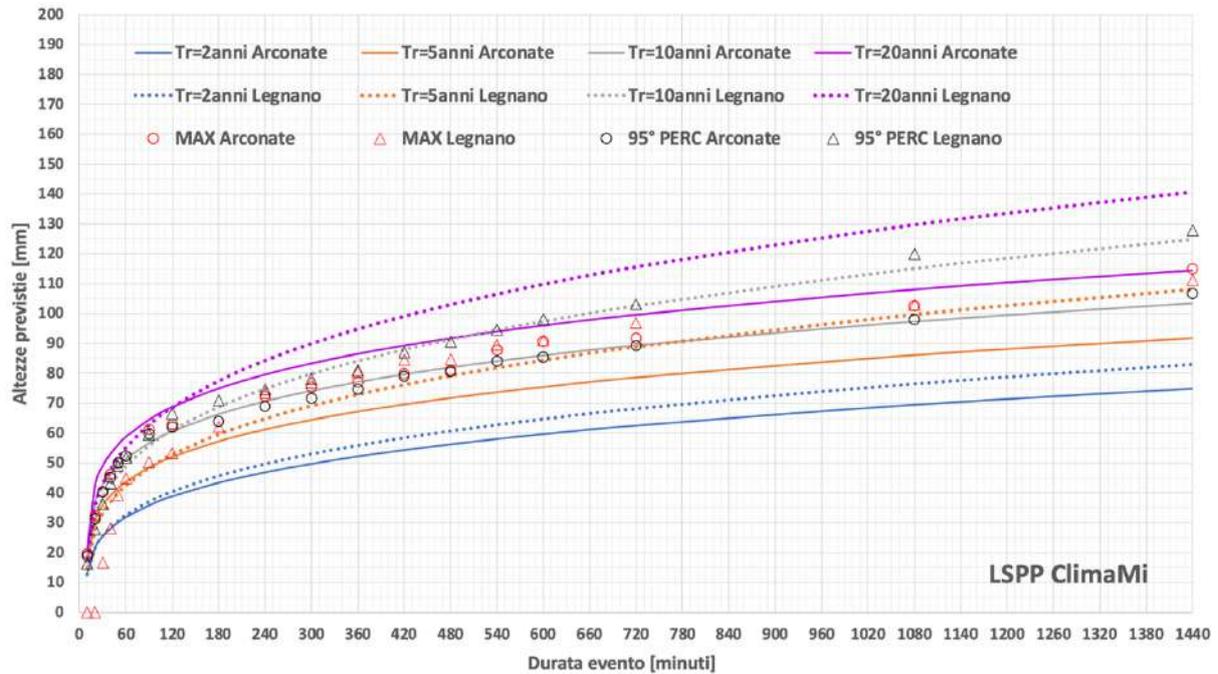


Fig. D.4.3: LSPP ClimaMi ed estremi osservati nelle stazioni Legnano (2013-2020) e Arconate (2010-2020)
Legnano (rete Fondazione OMD), Arconate (rete ARPA Lombardia)

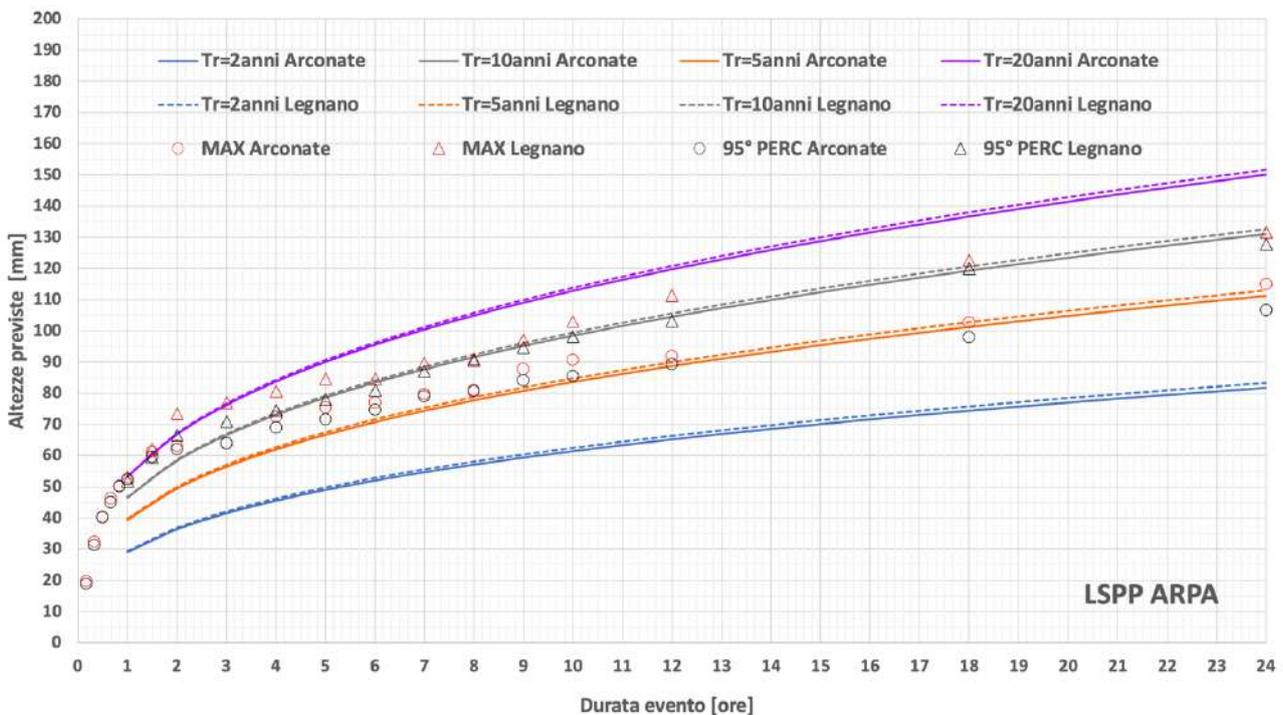


Fig. D.4.4: LSPP ARPA ed estremi osservati nelle stazioni Legnano (2013-2020) e Arconate (2010-2020)
Legnano (rete Fondazione OMD), Arconate (rete ARPA Lombardia)

BIBLIOGRAFIA E RIFERIMENTI

- Bacci P., Maugeri M., The urban heat island of Milan, Luglio 1992, Nuovo Cimento - Società Italiana di Fisica Sezione C 15(4):417-424 DOI: 10.1007/BF02511742
- Brunetti M., Maugeri M., Nanni T., Simolo C., and Spinoni J., 2014, High-resolution temperature climatology for Italy: Interpolation method intercomparison, International Journal of Climatology, 34, Number 4, p.1278-1296, DOI: 10.1002/joc.3764
- Ciegis R., Ramanauskiene J., Startiene G., Theoretical Reasoning of the Use of Indicators and Indices for Sustainable Development Assessment, The economic conditions of enterprise functioning, ISSN 1392 – 2785 Inzinerine Ekonomika-Engineering Economics (3). 2009
- CIMO Guide to Instruments and Methods of Observation, WMO nr. 8-Ed. 2018
- Crespi A., Brunetti M., Lentini G., Maugeri M., 2018, 1961-1990 high-resolution monthly precipitation climatologies for Italy, International Journal of Climatology, 38, 878-895, DOI: 10.1002/joc.5217
- Curci S., Lavecchia C., Frustaci G., Paolini R., Pilati S., Paganelli C., Assessing meteorology measure uncertainty in urban environments, Published 12 September 2017 • © 2017 IOP Publishing Ltd Measurement Science and Technology, Volume 28, Number 10 - Special Feature on Measurements of the Urban Environment: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1361-6501/aa7ec1/meta>)
- Duvernoy J., Guidance on the computation of calibration uncertainties, World Meteorological Organization WMO- IOM Report- No. 119; 2015
- European Environmental Agency Report - No 12/2016 - Urban adaptation to climate change in Europe 2016 - Transforming cities in a changing climate
- European Environmental Agency - Report No 22/2018 “Unequal exposure and unequal impacts: social vulnerability to air pollution, noise and extreme temperatures in Europe”
- Frustaci G., Lavecchia C., Paganelli C., Una rete di misura per la meteorologia urbana, Nimbus 73 Anno XXIII - N.1 Gennaio - Giugno 2015
- Frustaci G., Curci S., Pilati S., Lavecchia C., Paganelli C., The AWS based operational urban network in Milano: achievements and open questions, ICAWS2017, oral presentation O1_8, https://www.wmo.int/pages/prog/www/IMOP/AWS-conference/Papers/Topic_1/O1_8_Frustaci_The%20AWS%20based%20operational%20urban%20network%20in%20Milano.pdf
- García-Santos Vicente, Cuxart J., Martínez-Villagrasa D., Jiménez M. A., Simó G.: Comparison of Three Methods for Estimating Land Surface Temperature from Landsat 8-TIRS Sensor Data; Remote Sens. 2018, 10, 1450; doi:10.3390/rs10091450
- GICOS 200 Implementation Plan, WMO 2016
- GCOS 2016 Implementation Plan, Annex 1
- Giuliacci M., Bologna - E.R.S.A., 1988
- IPCC, 2018: Summary for Policymakers. In: Global warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas

- emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty [V. Masson-Delmotte, P. Zhai, H. O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P. R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J. B. R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M. I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, T. Waterfield (eds.)]. World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland, 32 pp.
- JCGM-BIPM: Evaluation of measurement data — Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM), 2008
 - Li Yang et al. “Research on Urban Heat-Island Effect”. In: *Procedia Engineering* 169 (2016), pp. 11–18
 - Masterson J.M., Richardson F.A., *Humidex: a method of quantifying human discomfort due to excessive heat and humidity*, 1979
 - Matthews T., *Climate Change Adaptation in Urban Systems: Strategies for Planning Regimes*, Griffith University - Urban Research Program - Research Paper 32, February 2011
 - Mennella C. *Il clima d'Italia nelle sue caratteristiche e varietà quale fattore dinamico del paesaggio*, vol. I, 1967; vol. II., 1972 - Napoli, Fratelli Conte Editore; M. Pinna, *Climatologia*, Torino, Utet, 1977
 - NYC Mayor’s Office of Recovery and Resiliency, *Climate Resiliency Design Guidelines - Version 3.0*, Marzo 2019
 - Oke T.R., *IOM Report Nr. 81*, 2004
 - Oke, T., Mills, G., Christen, A., & Voogt, J. (2017). *Urban Climates*. Cambridge: Cambridge University Press. doi:10.1017/9781139016476
 - Peel M. C., Finlayson B. L., McMahon T. A. 2007, Updated world map of the Köppen–Geiger climate classification, *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 11 (5): 1633–1644. doi: 10.5194/hess-11-1633-2007. ISSN 1027-5606
 - Porteron S., Leonardsen J., Hahn F., Attström K., Stener Pedersen H., Bailey T., Gander S., Huxley R., Sarfatti C., *URBAN CLIMATE ACTION IMPACTS FRAMEWORK - A Framework for Describing and Measuring the Wider Impacts of Urban Climate Action*, Ramboll & C40
 - Rozenstein Offer, Qin Z., Derimian Y., Karnieli A.: Derivation of Land Surface Temperature for Landsat-8 TIRS Using a Split Window Algorithm, *Sensors* 2014, 14, 5768-5780; doi:10.3390/s140405768
 - Santomauro L., *Lineamenti climatici di Milano 1763-1955*, Comune di Milano, 1957
 - Servizio Meteorologico dell'Aeronautica Militare, *Tabelle climatiche 1971-2000 della stazione meteorologica di Milano Linate, Atlante Climatico 1971-2000*
 - Shaw R., Colley M., Connell, R. (2007) *Climate change adaptation by design: a guide for sustainable communities*. TCPA, London
 - Stewart I.D., Oke T.R., *Local Climate Zones for urban temperature studies*. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 93: 1879-1900. December 2012
 - Voogt James A., (2004), *Urban Heat Island: Hotter Cities*. American Institute of Biological Sciences

- Wang Lei, Lu Y., Yao Y.: Comparison of Three Algorithms for the Retrieval of Land Surface Temperature from Landsat 8 Images, *Sensors* 2019, 19, 5049; doi:10.3390/s19225049
- World Meteorological Organization (WMO), Guidelines on the Calculation of Climate Normals, 2017 Edition
- World Meteorological Organization (WMO): Guide to Instruments and Methods of Observation, Volume V: Quality Assurance and Management of Observing Systems, 2018 Edition - Part I: Measurement of meteorological variables, 2017 Update., WMO, 2018 https://www.cittametropolitana.mi.it/Territori_resilienti/adattamento/index.html
- Ali, Rawshan Othman, and Shadan Rashid Abubaker. "Trend analysis using Mann-Kendall, Sen's slope estimator test and innovative trend analysis method in Yangtze river basin, China." *International Journal of Engineering & Technology* 8.2 (2019): 110-119
- ARPA Lombardia: "Il monitoraggio degli eventi estremi come strategia di adattamento ai cambiamenti climatici - Le piogge intense e le valanghe in Lombardia", 2015, http://www.progettostrada.net/media/report_conclusivi/Report_ARPA_Lombardia/Progetto_Strada_ARPA_Lombardia.pdf
- Becciu, G.; Mambretti, S.; Sanfilippo, U.; Brown, M.; Marelli, F.; Salvatore, A.: "Curve di possibilità pluviometrica di Milano-1971-2012 e cambiamenti climatici", in *Servizi a Rete*, 2016, Nr.2
- Brunetti, M., Maugeri, M., Monti, F. and Nanni, T.: "Temperature and precipitation variability in Italy in the last two centuries from homogenised instrumental time series." *Int. J. Climatol.*, 2006, 26: 345-381. <https://doi.org/10.1002/joc.1251>
- De Michele, C.; Rosso, R.; Rulli, M. C.: "Il regime delle precipitazioni intense sul territorio della Lombardia. Technical report, 2005, ARPA Lombardia, Milano
- Frei, C.; Isotta, F. A.: "Ensemble spatial precipitation analysis from rain gauge data: Methodology and application in the European Alps." *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2019, 124, 5757–5778. <https://doi.org/10.1029/2018JD030004>
- Gioia, A.; Lioi, B.; Totaro, V.; Molfetta, M.G.; Apollonio, C.; Bisantino, T.; Iacobellis, V. Estimation of Peak Discharges under Different Rainfall Depth–Duration–Frequency Formulations. *Hydrology* 2021, 8, 150. <https://doi.org/10.3390/hydrology8040150>
- Gumbel, E. J.: "Statistics of Extremes", 1958, 375 pp., Columbia Univ. Press, New York
- Marquardt, D.W.: "An algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters," *Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics*, 1963 11(2):431-441
- Wojdyr, M.: "Fityk: a general-purpose peak fitting program", *J. Appl. Cryst.* (2010). 43, 1126-1128, <https://doi.org/10.1107/S0021889810030499>