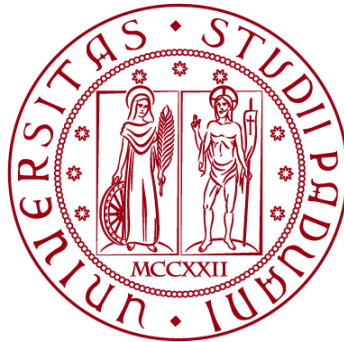


UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE, EDILE E AMBIENTALE

Department of Civil, Environmental and Architectural Engineering

Corso di Laurea in Ingegneria per l'Ambiente ed il Territorio



TESI DI LAUREA

**ONDATE DI CALORE, NOTTI TROPICALI E HOT DAYS A PADOVA:
ANALISI METEO-CLIMATICA DI EVENTI ESTREMI E SCENARI DI
ADATTAMENTO**

Relatore: PROF. SALVATORE PAPPALARDO

Co-tutor: PROF. ALESSANDRO FRANCESCO GIOVANNI CEPPI

Laureando: ANDREA SANTATERRA

ANNO ACCADEMICO 2022-2023

ABSTRACT

Il continente europeo ed in particolare la regione mediterranea sono considerati un importante *hotspot* di eventi meteorologici estremi come le ondate di calore. Gli ultimi rapporti dell'IPCC (AR6, 2021,2022) e numerosi studi scientifici confermano che l'aumento in frequenza e magnitudo degli eventi meteorologici estremi sia una delle conseguenze dei cambiamenti climatici, con impatti su scala regionale e locale. Le ondate di calore possono avere un importante impatto sul territorio, soprattutto in contesti fortemente antropizzati ove amplificano il fenomeno delle cosiddette isole di calore urbano.

Gli obiettivi del presente lavoro intendono identificare, quantificare e rappresentare, nei mesi estivi del 2022, eventi microclimatici estremi legati alla temperatura (ondate di calore, notti tropicali e *hot days*) ed eventuali differenze nelle dinamiche termiche in due aree della città di Padova. Ai fini delle analisi sono stati utilizzati i dati di due stazioni meteorologiche della rete MeteoNetwork, collocate in due distinti contesti urbani (quartieri Portello e Basso Isonzo), ed una di riferimento a Legnaro (stazione Arpav).

I risultati delle analisi mostrano che, dal 1 giugno al 31 agosto, il numero di notti tropicali è stato di 76 per la stazione Portello e 23 per Terre del fiume (Basso Isonzo), mentre quello di *hot days* è stato di 70 e 82 rispettivamente. La stazione mediamente più calda è risultata Portello (+1,2 °C su Terre del fiume).

Secondo le recenti analisi prodotte dal *Copernicus Climate Change Service*, l'estate del 2022 è stata, a scala europea, la più calda "on record", con ondate di calore che hanno impattato sulle infrastrutture urbane e sulla salute pubblica di diverse città metropolitane. Le analisi del presente studio mostrano che la città di Padova nel 2022 è stata particolarmente esposta, per frequenza e severità, ad eventi meteo-climatici estremi derivanti dalle alte temperature, anche a causa della probabile presenza del fenomeno di isola di calore urbana. Tuttavia il contributo – e l'eventuale implementazione - di infrastrutture verdi e blu, come parchi pubblici con formazioni arboree e corridoi fluviali, possono mitigare gli impatti ed adattare le infrastrutture urbane al clima che cambia.

INDICE

1 INTRODUZIONE	1
1.1 Definizioni	2
1.1.1 Estremi climatici ed eventi meteo estremi	2
1.1.2 Hot day	2
1.1.3 Ondate di calore	2
1.1.4 Notti tropicali	2
1.1.5 Heat Index	2
1.1.6 Isole di calore urbane	3
1.2 Inquadramento area di studio	4
1.2.1 Dati storici di temperatura	6
1.3 Obiettivi	8
2 MATERIALI E METODI	9
2.1 Stazioni meteorologiche	9
2.2 Identificazione delle ondate di calore e calcolo di indicatori meteo-climatici	11
2.2.1 Ondate di calore	11
2.2.2 <i>Heat Wave Magnitude Index daily</i>	12
2.2.3 <i>Heat Index</i>	13
2.2.4 <i>Hot days</i>	14
2.3 Software per l'analisi dei dati	15
3 RISULTATI	17
3.1 Temperatura	17
3.2 <i>Hot days</i>	21
3.3 Ondate di calore e HWMIId	22
3.4 <i>Heat Index</i>	24
3.5 Notti tropicali	25
3.6 Discussione sui risultati	27
3.6.1 Temperatura ed eventi estremi	27
3.6.2 L'isola di calore urbana nella città di Padova	28
3.6.3 Mitigazione e adattamento al cambiamento climatico nel contesto urbano	29
4 CONCLUSIONI	33
Approfondimento	37
BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA	40

1 INTRODUZIONE

Il cambiamento del clima terrestre è un fenomeno in atto già da diversi decenni ed in continua progressione ed evoluzione. L'organismo internazionale *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC) ha dimostrato, nei suoi più recenti rapporti, che le cause del cambiamento climatico sono da attribuire, con ogni probabilità, alle attività antropiche (IPCC, AR6, 2021), le quali sono responsabili dell'emissione di gas climalteranti ("gas serra") che influiscono sul bilancio radiativo terrestre, sfruttano le risorse naturali al di sopra della *carrying capacity* degli ecosistemi e modificano l'ambiente con effetti negativi sulla biodiversità e sulla salute dell'uomo stesso.

Numerosi studi e rapporti scientifici affermano, inoltre, che il riscaldamento globale in atto comporterà un aumento della frequenza e della magnitudo degli eventi meteorologici estremi, quali ondate di calore, alluvioni, siccità e incendi. Secondo un recente studio di Rousi et al. (2022) il continente europeo - ed in particolare le regioni mediterranee - viene identificato come un *hotspot* per eventi meteorologici estremi legati al cambiamento climatico, in particolare in riferimento alle ondate di calore; in tale studio è stato stimato che l'aumento della frequenza delle ondate di calore sarà di 3-4 volte maggiore rispetto alle regioni delle medie latitudini. Su scala locale, è possibile affermare che le città e gli agglomerati urbani subiranno gravi conseguenze dovute al riscaldamento globale e all'acuirsi degli eventi estremi poiché, per fattori principalmente legati all'impermeabilizzazione del suolo, all'albedo ed alla morfologia urbana, amplificano l'effetto delle ondate di calore combinandosi con le cosiddette isole di calore, ossia settori della città in cui si raggiungono temperature considerevolmente maggiori rispetto alle zone rurali extra cittadine. Vari fattori contribuiscono alla formazione delle isole di calore: accumulo di calore dovuto alla ridotta riflessione della radiazione solare (albedo) causata dai materiali con cui tipicamente sono costruiti gli edifici e le opere di urbanizzazione, uso del suolo, assenza di vegetazione e attività antropiche che rilasciano calore (condizionamento e riscaldamento domestico e veicoli a combustione).

La riprogettazione delle città affinché siano resilienti al cambiamento climatico è uno degli obiettivi delle Nazioni Unite per lo sviluppo sostenibile elencati nell'Agenda 2030. L'ONU, infatti, prevede un aumento della percentuale di popolazione globale residente in aree urbane fino al 68% entro il 2050 (contro il 55% nel 2018). Pertanto, sono attualmente in fase di studio politiche, strategie e tecniche ingegneristiche che possano contribuire alla mitigazione degli effetti di ondate ed isole di calore urbano, in modo da garantire un ambiente più confortevole, sicuro ed inclusivo. In particolare, si stanno progettando soluzioni per contrastare il fenomeno delle isole di calore urbane, fattore di disagio e rischio per la salute della popolazione, da non sottovalutare soprattutto in previsione di un ulteriore aumento frequenza e magnitudo di tali fenomeni.

1.1 Definizioni

1.1.1 Estremi climatici ed eventi meteo estremi

Un evento meteorologico estremo è un evento che si manifesta con ridotta frequenza nello spazio e nel tempo, tipicamente con un'intensità eccezionale (IPCC AR6, 2021). Per determinare quanto sia estremo un certo evento, generalmente si considera una soglia al di sopra (o al di sotto) della quale si verifica la condizione di estremo; in questa indagine vengono utilizzate soglie sia assolute (es. valore di temperatura) che relative (percentili). Dunque un evento può essere considerato estremo sia in relazione alla sua frequenza di manifestazione che alla sua particolare intensità. Eventi estremi analizzati in questo studio sono *hot days*, ondate di calore e notti tropicali.

1.1.2 Hot day

Il termine *hot day* (giorno caldo) viene utilizzato in ambito scientifico per identificare i giorni in cui si manifestano temperature insolitamente elevate per il luogo e il periodo. L'*European Environmental Agency* adottabile a livello paneuropeo la temperatura soglia di 30 °C, al di sopra della quale si verifica la condizione di *hot day*, riconoscendo comunque la possibilità di considerare valori più elevati per indagini su scala locale in regioni notoriamente più calde (EEA, 2020). In questa tesi è stato calcolato un valore soglia utile all'individuazione degli *hot days* specifico per la città di Padova.

1.1.3 Ondate di calore

Un'ondata di calore (*heat wave*) è un periodo prolungato durante il quale persistono temperature eccezionalmente elevate. Si considera ondata di calore l'evento durante il quale in una determinata area la temperatura massima giornaliera supera un prefissato valore soglia di riferimento per tre o più giorni consecutivi. Generalmente, il valore soglia di temperatura viene identificato nel 90° o 95° percentile della distribuzione delle temperature massime giornaliere ottenuta da una serie di dati storica di riferimento – tipicamente di trent'anni - per l'area oggetto dello studio (Russo et al. 2014).

1.1.4 Notti tropicali

Le “notti tropicali” o *tropical nights* rientrano nell'elenco degli eventi meteorologici estremi e corrispondono alle notti in cui la temperatura è maggiore di 20 °C (*European Environmental Agency, 2020*).

1.1.5 Heat Index

L'*Heat Index* (HI), comunemente noto anche come “temperatura percepita”, è un indice che combina temperatura dell'aria esterna e umidità per valutare il livello di comfort termico percepito dalle persone. È noto infatti che il corpo umano sfrutti l'evaporazione del sudore come meccanismo di

raffreddamento, il quale tuttavia viene ostacolato in presenza di un'elevata umidità esterna, poiché un alto contenuto d'acqua nell'aria riduce l'efficienza del processo di evaporazione. Pertanto, in condizioni di elevate temperatura esterna e umidità si percepisce una sensazione di surriscaldamento maggiore rispetto a una condizione di umidità minore a parità di temperatura. L'HI viene dunque utilizzato per quantificare la temperatura percepita in modo da prevedere e valutare possibili impatti sulla salute delle persone.

1.1.6 Isole di calore urbane

Con il termine isola di calore urbana si identificano le aree di una città in cui si manifestano comunemente temperature maggiori rispetto ad altre zone della stessa città e in particolar modo alle zone rurali extra urbane. Le origini delle isole di calore urbane sono identificabili nelle particolari attività umane che vi hanno luogo (trasporti, industrie, riscaldamento, condizionamento), nella loro conformazione (densità, prossimità e altezza degli edifici, aerazione) e nelle loro caratteristiche fisiche (materiali costruttivi, copertura del suolo, assenza di aree vegetate e corpi idrici superficiali) che alterano in diversi modi il bilancio energetico all'interno dell'ambiente urbano.

Le misure per calcolare l'intensità delle isole di calore si basano sulla differenza tra le temperature urbane e quelle delle aree rurali circostanti, con la formula: $i = \Delta T_u - T_r$ dove i =intensità, T_u =temperatura urbana e r =temperatura rurale (Oke, 1978).

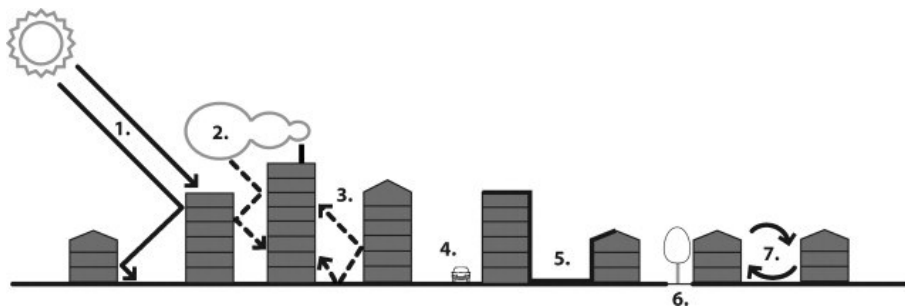


Figura 1 Meccanismo di creazione di un'isola di calore urbana (Kleerekoper et al., 2012)

1. Assorbimento della radiazione solare da parte di materiali a bassa albedo, riflessione e cattura negli spazi fra gli edifici
2. Le particelle inquinanti presenti nell'atmosfera assorbono e riemettono parte della radiazione solare nell'ambiente urbano
3. Parte della radiazione termica è intercettata dagli edifici e rimane all'interno del tessuto urbano ("effetto canyon")
4. Attività antropiche che utilizzano processi di combustione come veicoli a motore, riscaldamento e industrie rilasciano calore all'interno dell'ambiente urbano
5. Accumulo di calore da parte di materiali ad alta capacità termica
6. La presenza di superfici artificiali e non drenanti al posto di quelle vegetate implicano un maggior trasferimento di energia sotto forma di calore sensibile e non di calore latente
7. La presenza dei volumi edificati influenza il trasporto di calore tramite ventilazione

1.2 Inquadramento area di studio

In questo studio vengono analizzate le dinamiche meteorologiche che hanno interessato la città di Padova (latitudine 45°24'23''N, longitudine 11°52'40''E, sede del Municipio) tra febbraio e agosto dell'anno 2022. La città di Padova presenta le caratteristiche di un mesoclima temperato sub-continentale, tipico della Pianura Padana, che presenta estati calde e afose e inverni freddi e umidi (Pinna, 1978). Il territorio comunale si estende per circa 93 km²; il centro storico ricopre circa 9 km² ed è caratterizzato da un'elevata densità costruttiva, interrotta da numerosi ma relativamente piccoli parchi e aree verdi. È presente un'estesa rete di canali che avvolgono il centro storico e che rivestono un ruolo importante nelle dinamiche termiche della città (Pristeri et al 2020).

Le aree che ospitano le tre stazioni meteorologiche oggetto dello studio differiscono quanto a morfologia ambientale e copertura e uso del suolo. Come visibile dall'immagine satellitare (figura 2), il quartiere Portello, che ospita l'omonima stazione, è caratterizzato da un'alta densità costruttiva senza soluzione di continuità e da una copertura del suolo quasi totalmente artificiale (strade, piazze, edifici). Permane comunque la presenza del corridoio fluviale del canale Piovego e della soprastante vegetazione arborea ripariale. A sud-ovest del centro storico della città si trova il quartiere Basso Isonzo, nel quale è installata la stazione "Terre del fiume". L'area circostante a questa stazione è visibilmente diversa dalla precedente, infatti è caratterizzata da un'utilizzo prevalentemente agricolo a copertura verde e naturale, distante da agglomerati urbanizzati. Infine, per completare lo studio e permettere ulteriori confronti, è stata considerata anche la stazione ARPAV situata nel territorio comunale di Legnaro, a circa 8 km a sud-est della città di Padova, nella proprietà dell'Azienda Sperimentale "L. Toniolo" dell'Università di Padova, in un'area a prevalente utilizzo del suolo agricolo ma comunque prossima all'area edificata del complesso universitario.

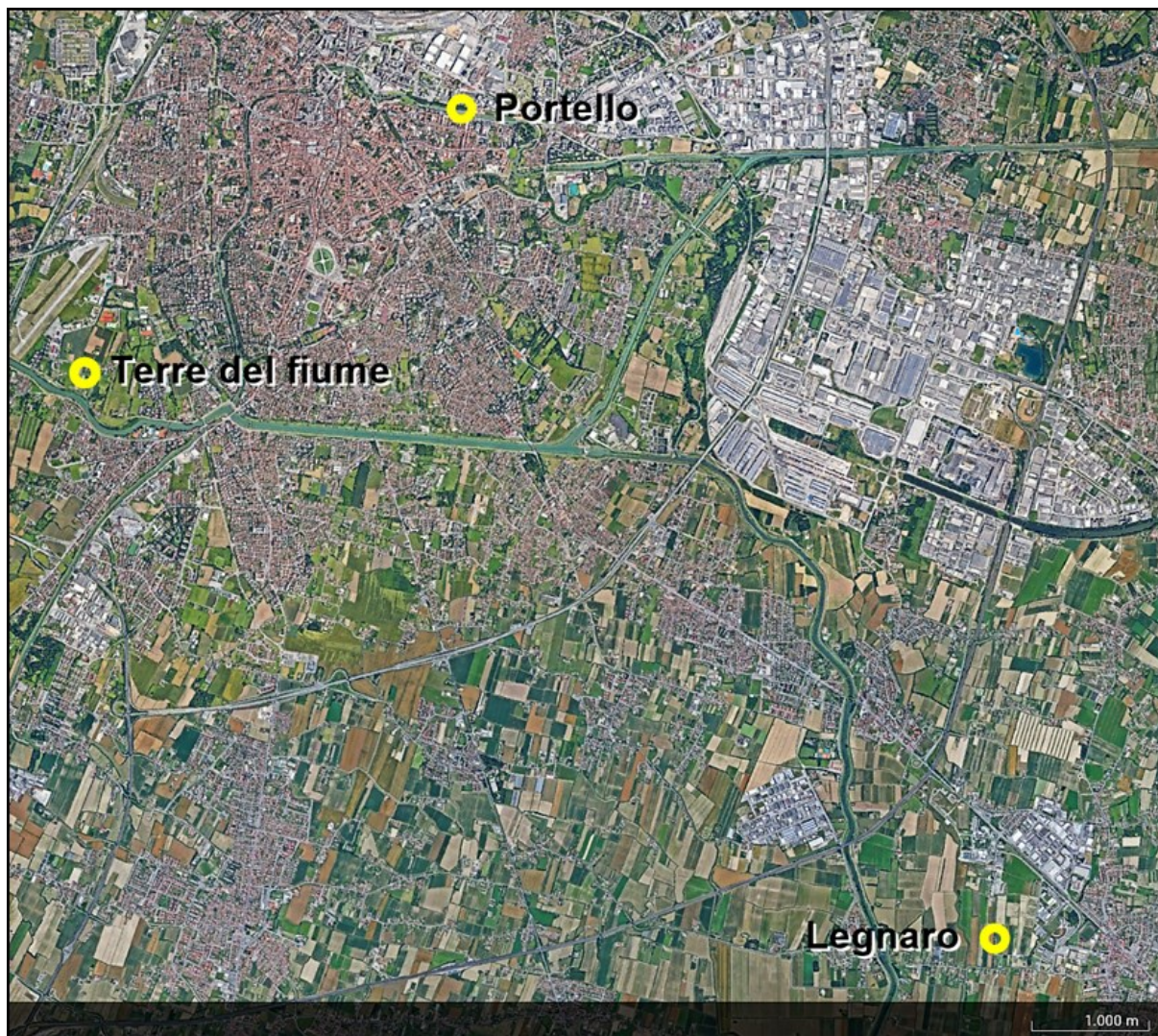


Figura 2 Carta di inquadramento dell'area oggetto dello studio con l'ubicazione delle tre stazioni meteorologiche (Immagine satellitare Google Earth Pro)



Figura 3 Dettaglio dell'area urbana di Padova con evidenziate le due stazioni cittadine (Immagine satellitare Google Earth)

1.2.1 Dati storici di temperatura

Tramite la consultazione della piattaforma online *Climate Data Store* del *Copernicus Climate Change Service* è possibile risalire alle caratteristiche medie mensili di temperatura massima, minima e media per diverse città europee tra cui Padova. I dati sono ottenuti dal modello di rianalisi meteo-climatica di quinta generazione ERA5, implementato con l'obiettivo finale di ricostruire sulla base di osservazioni e calcoli l'evoluzione di alcuni parametri climatici a partire dal 1950.

Nel caso della città di Padova, sono disponibili i valori medi di temperatura per l'intervallo temporale 1981-2010, con risoluzione annuale e mensile, assieme ad alcuni dati su eventi estremi come notti tropicali e giorni estivi, ovvero con temperatura massima superiore a 25 °C, e *frost days*, in cui la temperatura scende sotto i 0 °C. Rispetto al trentennio 1981-2010, per Padova è stata calcolata una temperatura media annuale di 14,5 °C. Il valore medio dei mesi JJA è di 24,3 °C e tra di essi il mese più caldo risulta essere luglio con una temperatura media di 25,4 °C.

Sempre secondo i calcoli di ERA5, la città di Padova ha mediamente sperimentato nei mesi JJA il fenomeno delle notti tropicali nel 45% dei giorni, con frequenza maggiore nel mese di luglio (57,7%).

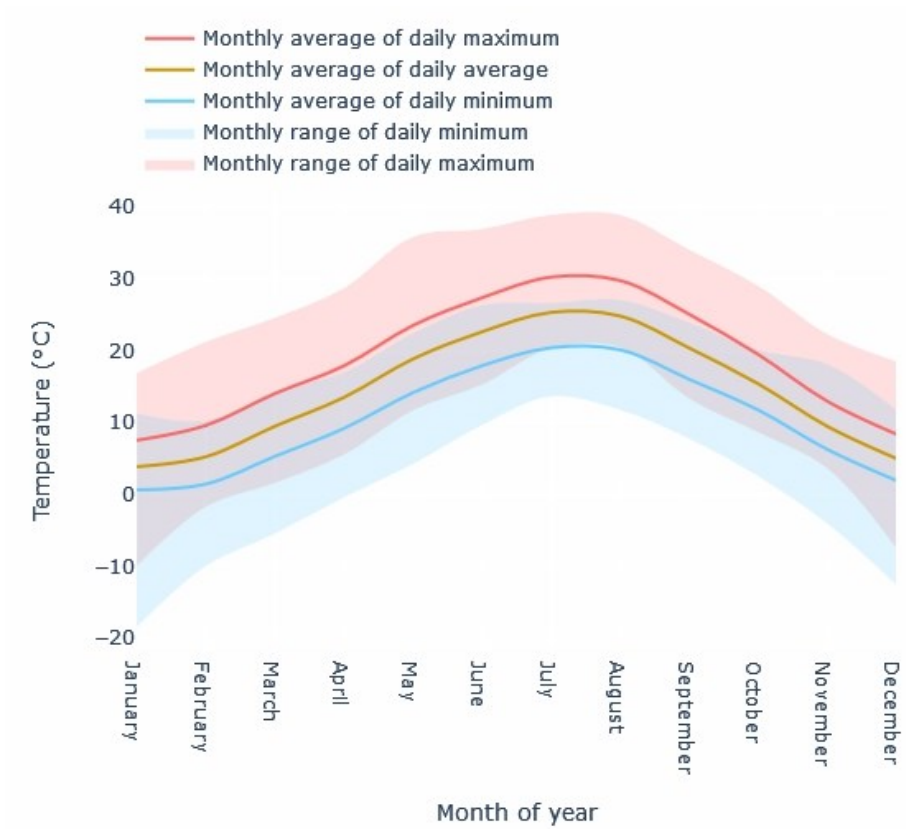


Figura 4 Valori mensili di temperatura massima, minima e media per la città di Padova calcolati sul periodo 1981-2010 (CCCS ERA5)

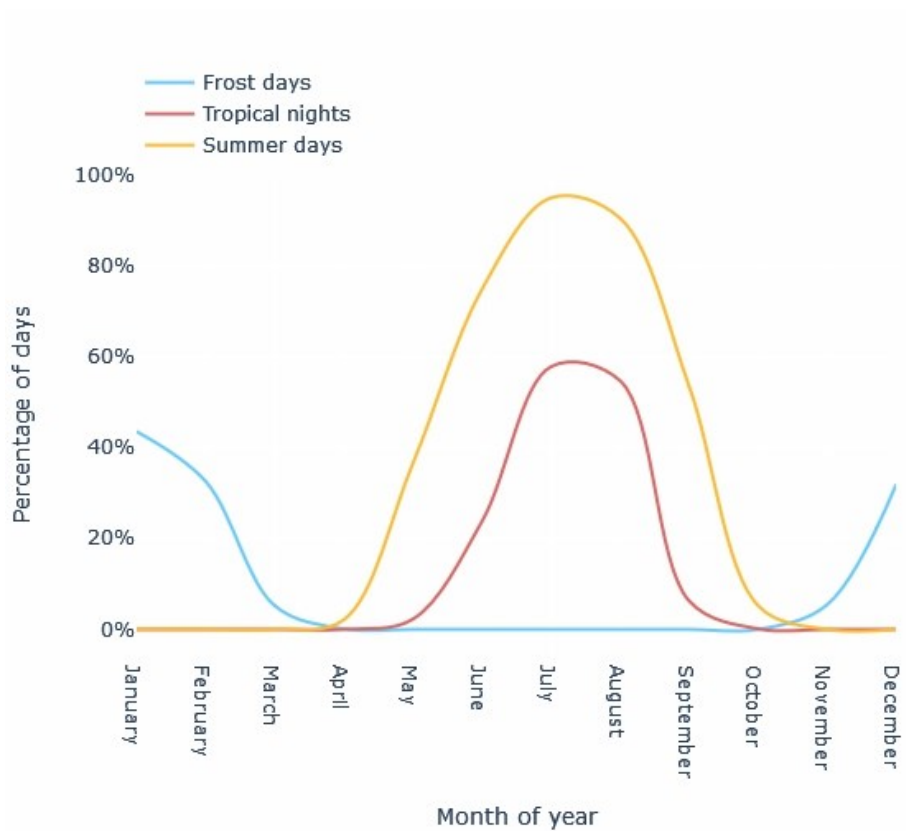


Figura 5 Percentuali mensili di giorni con eventi di frost days ($T_{min} < 0\text{ }^{\circ}\text{C}$), notti tropicali ($T_{min} > 20\text{ }^{\circ}\text{C}$) e giorni estivi ($T_{max} > 25\text{ }^{\circ}\text{C}$) calcolate per Padova sul periodo 1981-2010 (CCCS ERA5)

1.3 Obiettivi

Questa indagine si pone l'obiettivo di individuare e quantificare alcuni eventi estremi legati alla temperatura che hanno avuto luogo nel territorio della città di Padova tra i mesi di febbraio e agosto del 2022, volgendo particolare attenzione ai mesi estivi tipicamente definiti come "JJA" (*June, July, August*). Per tale scopo sono state utilizzate le registrazioni di tre stazioni meteorologiche situate nell'intorno della città, diverse tra loro per collocazione geografica e per morfologia dell'ambiente circostante. I dati raccolti sono stati analizzati con lo scopo di evidenziare eventuali differenze tra le dinamiche meteo-climatiche dei diversi ambienti che caratterizzano l'area oggetto dello studio e fornire le basi per una discussione sulle problematiche relative a condizioni climatiche che adducono disagi alla popolazione residente e su possibili soluzioni ingegneristiche.

2 MATERIALI E METODI

2.1 Stazioni meteorologiche

In questo studio sono state prese in considerazione tre stazioni meteorologiche, di seguito denominate Portello, Terre del fiume e Legnaro. La stazione Portello è situata nell'omonimo quartiere della città di Padova, sul tetto dell'edificio sede del DICEA dell'Università (latitudine $45^{\circ}24'35''$ N, longitudine $11^{\circ}53'20''$ E). La stazione è un modello Davis Vantage Pro 2. La stazione Terre del fiume, invece, è situata in località Basso Isonzo a sud-ovest del centro di Padova ($45^{\circ}23'23''$ N, $11^{\circ}50'59''$ E), meno urbanizzata e caratterizzata da un uso del suolo principalmente agricolo. Anch'essa è un modello Davis Vantage Pro 2. Le stazioni Portello e Terre del fiume fanno parte della comunità online MeteoNetwork che raggruppa nel proprio sito web numerose stazioni installate in tutto il continente europeo e in Italia e che permette di consultare in tempo reale i valori delle variabili meteorologiche. Alla rete MeteoNetwork può partecipare chiunque possiede una stazione meteorologica certificata e che desideri condividere i dati che essa raccoglie e per questo motivo rappresenta un'importante realtà nel campo della *Citizen Science*. Infine, vi è la stazione Legnaro, gestita da ARPAV (Agenzia Regionale per la Protezione Ambientale del Veneto), situata 8 km a sud-est del centro di Padova. Oltre ai dati registrati dalle tre stazioni, è stata impiegata per fini di confronto la serie di misurazioni di ARPAV per gli anni 1992-2021, ossia 30 anni di rilevamenti come raccomandato dalla WMO (*World Meteorological Organization*) per le analisi comparative in ambito climatico (WMO, 2017).

Tra le variabili misurate dalle tre stazioni, sono state utilizzate in particolare temperatura esterna media, minima e massima e umidità relativa, relativamente a due intervalli temporali: il primo comprende i giorni di misurazione dal 21 febbraio 2022 fino al 30 agosto 2022 ed è stato impiegato per acquisire una visione generale del comportamento delle tre stazioni e della variabilità stagionale dei valori. Il secondo intervallo comprende i tre mesi di giugno, luglio e agosto, canonici per l'analisi degli eventi estremi legati alla temperatura.

Le due stazioni della rete MeteoNetwork forniscono i dati meteorologici a intervalli di mezz'ora, calcolati come media dei valori misurati durante i trenta minuti. La stazione di Legnaro, invece, impiega la stessa modalità di fornire dei valori medi, relativi però ad intervalli di un'ora. È stato dunque necessario per il confronto delle serie di rilevazioni delle tre stazioni trasporre i dati delle stazioni Portello e Terre del fiume secondo una scansione oraria, effettuando la media aritmetica dei valori compresi nell'intervallo di interesse.



Figura 6 Modello di stazione meteorologica Davis Vantage Pro 2 (davisinstrument.com)

Il modello di stazione meteorologica Davis Vantage Pro 2 è composta da due parti principali: il complesso dei sensori e una console interattiva. La strumentazione della stazione in oggetto comprende un collettore per la pioggia, un anemometro e i sensori di temperatura e umidità dell'aria esterna. Questi due sono riparati dalla radiazione solare per ridurre possibili errori di misurazione. La console, invece, ospita un barometro e i sensori di temperatura e umidità interne, permette la visualizzazione dei dati ed esegue i calcoli di alcuni parametri meteorologici derivanti dalle misurazioni.

Specifiche tecniche Davis Vantage Pro 2:

Temperatura di esercizio: da -40 °C a +65 °C

Collettore di pioggia: cucchiaio ribaltabile

Sensore di temperatura: diodo al silicene a giunzione p-n

Sensore di umidità: elemento condensatore a film

	Range	Risoluzione	Accuratezza	Int. Aggiornamento
Umidità	1-100%	1%	±2%	50-60s
Temperatura	-40 °C - +65 °C	0,1 °C	±0.3 °C	10-12s
Precipitazione	0-999.8mm	0,2mm	±3%	20-24s

2.2 Identificazione delle ondate di calore e calcolo di indicatori meteo-climatici

2.2.1 Ondate di calore

Al fine di identificare una giornata “candidata” ad essere nel range degli eventi estremi per le ondate di calore è stata adottata la metodologia di Russo et al. (2014) per l’analisi di tale fenomeno. La presente metodologia adotta come valore soglia il 90° percentile della distribuzione delle temperature giornaliere massime relativa ad un periodo di riferimento, considerando una finestra mobile di 31 giorni centrata nel giorno di interesse. Qualora nell’arco della giornata sotto esame venga rilevato un dato di temperatura superiore al valore soglia, tale giorno viene considerato giorno di ondata di calore. Sono considerate ondate di calore effettive i periodi di almeno tre giorni consecutivi che soddisfano il criterio di Russo et al (2014). La distribuzione D è stata derivata in questo caso dal database ARPAV per l’intervallo temporale 1992-2021, il quale contiene i dati delle misurazioni effettuate dalla stazione Legnaro nel corso dei 30 anni. Di conseguenza, è stato possibile individuare solo le ondate di calore verificatesi nel settore della suddetta stazione, poiché per le altre due stazioni, di più recente installazione, non sono disponibili serie di rilevazioni sufficientemente numerose per lo scopo. Nell’analisi delle ondate di calore sono stati inclusi i mesi di maggio, giugno, luglio e agosto del 2022.

La formula per il calcolo della distribuzione D di riferimento è la seguente:

$$D = \bigcup_{y=1992}^{2021} \bigcup_{i=giorno-15}^{giorno+15} T_{max_{y,i}}$$

Con:

D = distribuzione da cui si è ricavato il 90° percentile

y = anno della serie ARPAV

i = giorno di indagine

$T_{max_{y,i}}$ = massima temperatura registrata nel giorno i dell’anno y

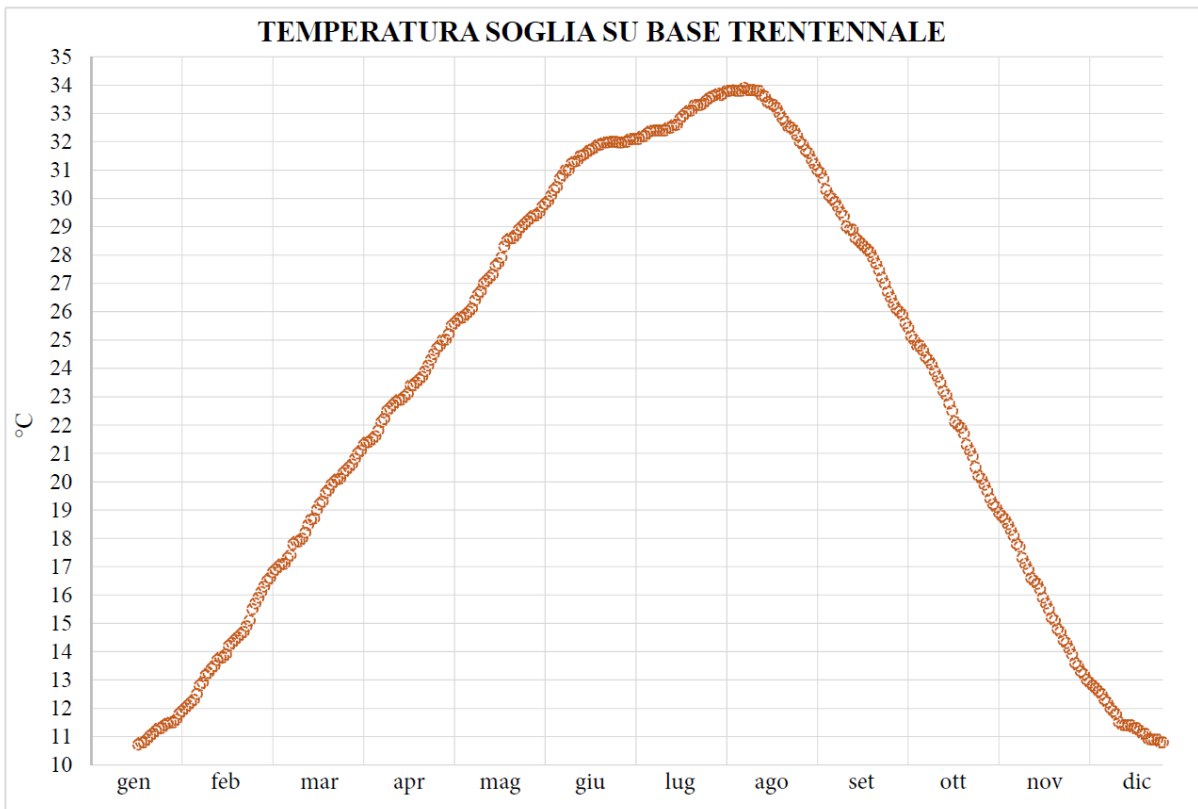


Figura 7 90° percentile della distribuzione delle temperature giornaliere massime D di Russo per l'anno 2022 (Legnaro)

La figura 5 mostra l'evoluzione temporale dei valori soglia di temperatura (percentili della distribuzione D) per l'individuazione dei giorni di ondata di calore calcolati per il 2022 sulla base delle rilevazioni meteo-climatiche di ARPAV effettuate dal 1992 al 2021 presso la stazione di Legnaro. L'andamento del grafico assume una forma a campana, crescente nei primi 8 mesi dell'anno e discendente a partire da fine agosto. I valori raggiungono temperature poco al di sotto degli 11 °C durante i mesi invernali (10,8 °C) per poi aumentare da metà gennaio fino al massimo tra gli inizi e la metà di agosto (33,9 °C), dopodiché la curva incomincia a scendere nei mesi autunnali. Più in dettaglio, nei mesi di luglio e agosto il valore soglia si è mantenuto quasi totalmente al di sopra dei 32°C, evidenziando come le ondate di calore accadute in tale finestra temporale siano state caratterizzate da una condizione di caldo estremo.

2.2.2. Heat Wave Magnitude Index daily

Nelle analisi degli estremi climatici viene adottato l'indice *Heat Wave Magnitude Index daily* (HWMId), ovvero indice di magnitudo dell'ondata di calore, che corrisponde alla somma delle magnitudo dei giorni consecutivi che rientrano nell'ondata di calore (Russo et al., 2015). L'HWMId permette di comparare la severità di ondate di calore avvenute in giorni diversi in una stessa area e di ondate di calore verificatesi in punti diversi dell'intero pianeta. La magnitudo dell'ondata di calore è

stata calcolata utilizzando i valori del 25° e 75° percentile della distribuzione delle temperature giornaliere massime ricavate dalla serie ARPAV 1992-2021, assieme alle temperature massime registrate nei giorni di indagine. Il calcolo viene eseguito solamente per i giorni i cui la temperatura massima eccede il 25° percentile, in modo tale da assicurare la condizione di eccezionalità.

$$M_d(T_d) = \begin{cases} \frac{T_d - T_{30y25p}}{T_{30y75p} - T_{30y25p}} & \text{se } T_d > T_{30y25p} \\ 0 & \text{se } T_d \leq T_{30y25p} \end{cases}$$

$$HWMId = \sum_{HWd=1}^n M_d$$

Con:

M_d = magnitudo giornaliera

T_d = temperatura massima giornaliera

T_{30y25p} = 25° percentile della distribuzione delle temperature massime giornaliere registrate dal 1992 al 2021

T_{30y75p} = 75° percentile della distribuzione delle temperature massime giornaliere registrate dal 1992 al 2021

HWd = giorno di ondata di calore

2.2.3 Heat Index

La formula per il calcolo del valore di Heat Index (HI) utilizzata è quella ricavata da L.P. Rothfus (NWS SR 90-23, 1990), in seguito approvata ed utilizzata dall'ente federale statunitense NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*), adattata per il calcolo in cui la temperatura T è espressa in gradi Celsius e l'umidità relativa RH in percentuale:

$$\begin{aligned} HI = & -42,379 + 2,04901523 * \left[\left(\frac{9}{5} * T \right) + 32 \right] + 10,14333127 * RH - 0,22475541 * \left[\left(\frac{9}{5} * T \right) + 32 \right] \\ & * RH - 6,83783 * 10^{-3} * \left[\left(\frac{9}{5} * T \right) + 32 \right]^2 - 5,481717 * 10^{-2} * RH^2 + 1,22874 * 10^{-3} \\ & * \left[\left(\frac{9}{5} * T \right) + 32 \right]^2 * RH + 8,5282 * 10^{-4} * \left[\left(\frac{9}{5} * T \right) + 32 \right] * RH^2 - 1,99 * 10^{-6} \\ & * \left[\left(\frac{9}{5} * T \right) + 32 \right]^2 * RH^2 \quad [^{\circ}C] \end{aligned}$$

HEAT INDEX [°C]

T [°C]	RH [%]												
	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100
47	58												
43	54	58											
41	51	54	58										
40	48	51	55	58									
39	46	48	51	54	58								
38	43	46	48	51	54	58							
37	41	43	45	47	51	53	57						
36	38	40	42	44	47	49	52	56					
34	36	38	39	41	43	46	48	51	54	57			
33	34	36	37	38	41	42	44	47	49	52	55		
32	33	34	35	36	38	39	41	43	45	47	50	53	56
31	31	32	33	34	35	37	38	39	41	43	45	47	49
30	29	31	31	32	33	34	35	36	38	39	41	42	44
29	28	29	29	30	31	32	32	33	34	36	37	38	39
28	27	28	28	29	29	29	30	31	32	32	33	34	35
27	27	27	27	27	28	28	28	29	29	29	30	30	31

- Probabili infarto e colpo di sole
- Possibili colpo di sole, crampi muscolari e collasso da calore. Possibile infarto in caso di prolungata esposizione e/o attività fisica
- Possibili colpo di sole, crampi muscolari e collasso da calore in caso di prolungata esposizione e/o attività fisica
- Affaticamento in caso di prolungata esposizione e/o attività fisica

Figura 8 Valori di HI in funzione di temperatura e umidità relativa (NOAA)

Oltre alla formula, la NOAA ha redatto una tabella in cui sono tabulati i diversi valori di HI in funzione di determinate condizioni di temperatura e umidità. Vi sono inoltre evidenziati con colori diversi gli intervalli di temperatura percepita per i quali si possono presentare condizioni di rischio più o meno elevato per la salute ed il benessere delle persone.

2.2.4 Hot days

Il valore soglia della temperatura oltre il quale si può considerare effettivamente caldo un giorno assume valori diversi a seconda del clima caratteristico della regione e del periodo di interesse. Per il caso di Padova, è stata considerata la serie di rilevazioni meteo-climatiche di ARPAV effettuate dalla stazione di Legnaro, da cui sono stati ricavati i valori medi mensili delle temperature massime giornaliere dei mesi JJA per l'intervallo temporale 1994-2020. Si è quindi calcolato il valore medio sui 28 anni per ciascuno dei tre mesi, ottenendo i valori di 27,4 °C per giugno, 29,6 °C per luglio e 29,5 °C per agosto. Partendo da questi tre valori, sono stati adottati come soglie per l'identificazione degli *hot days* due valori di temperatura, 30 °C e 32 °C, i quali essendo maggiori dei valori medi

precedentemente calcolati rappresentano il raggiungimento di una condizione eccezionale. L'analisi degli *hot days* è stata effettuata per tutte e tre le stazioni prendendo in considerazione i mesi di giugno, luglio e agosto del 2022.

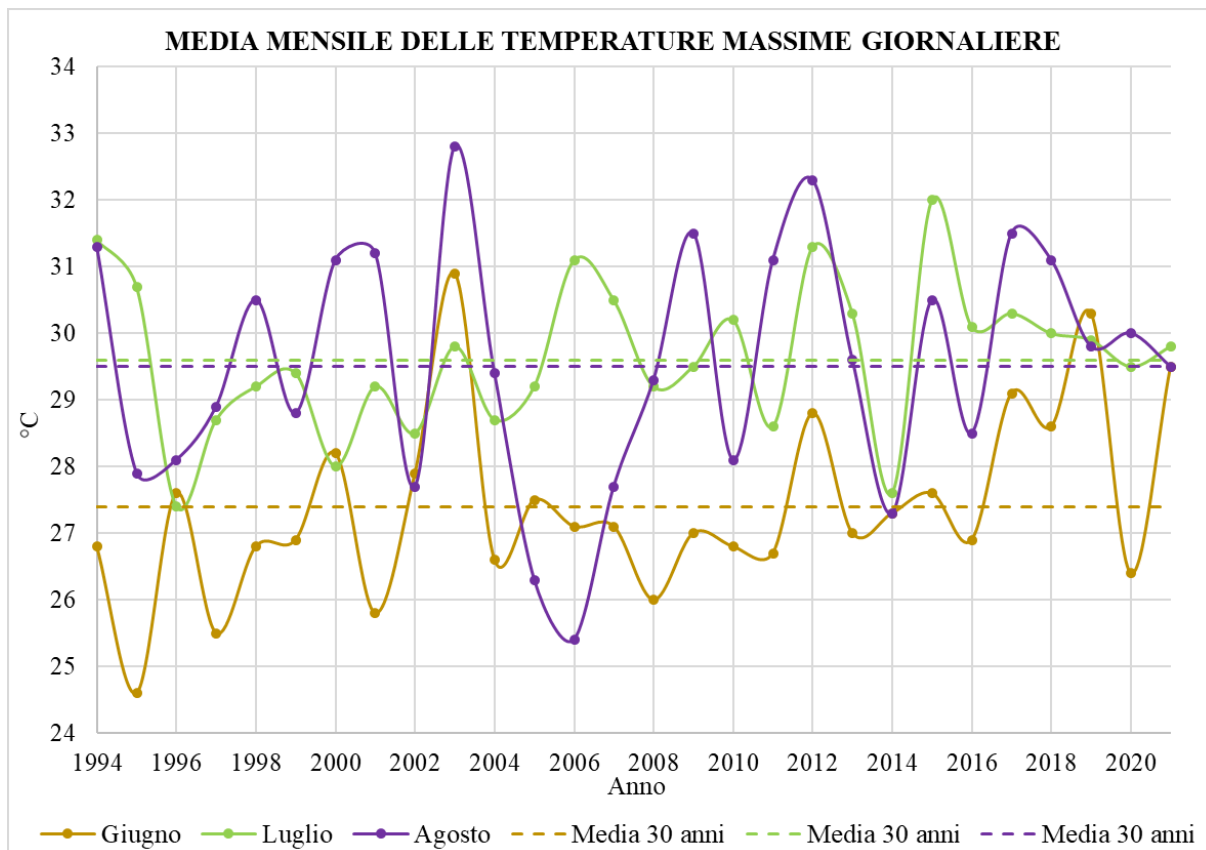


Figura 9 Media delle temperature giornaliere massime per i mesi giugno, luglio e agosto dal 1994 al 2021 (elaborazione dati ARPAV-Legnaro)

2.3 Software per l'analisi dei dati

Nella conduzione dell'indagine sono stati impiegati i software desktop WeatherLink 6.0.5, sviluppato dalla casa di produzione di stazioni e strumenti meteorologici Davis, per scaricare e visualizzare i dati meteorologici e Microsoft® Excel per la loro elaborazione.

3 RISULTATI

3.1 Temperatura

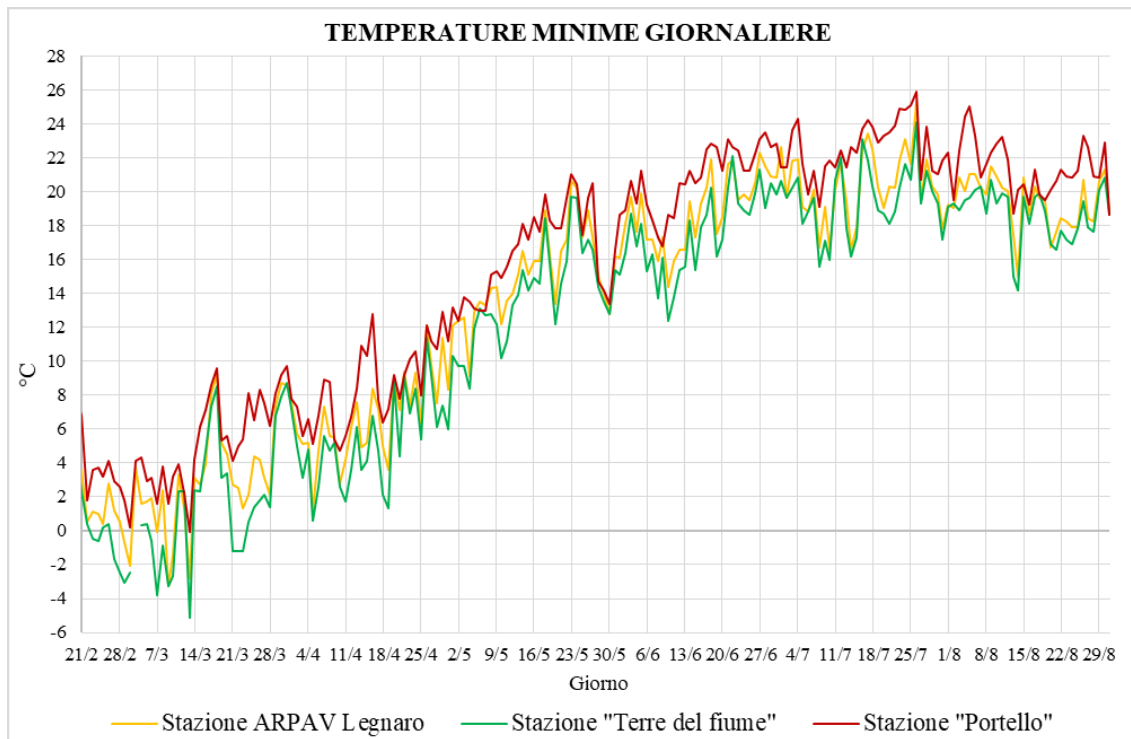


Figura 10 Temperature minime giornaliere dal 21 febbraio al 31 agosto 2022

Il grafico di figura 10 mostra il profilo temporale delle temperature minime giornaliere rilevate dalle tre stazioni nel periodo 21 febbraio-30 agosto 2022 (191 giorni). È possibile apprezzarvi la variazione stagionale della temperatura tra i mesi invernali, primaverili, ed estivi: a partire da metà marzo, infatti, si nota un'impennata dei valori in tutte e tre le curve che si assestano poi nel range 15 °C-25 °C nei mesi JJA. Confrontando i dati forniti dalle tre stazioni, risulta quasi per l'intero arco temporale che la curva delle minime della stazione Portello sia caratterizzata da valori maggiori rispetto a Terre del fiume e, a seguire, Legnaro. In particolare, la differenza tra i valori di Terre del fiume e Legnaro è visibilmente inferiore rispetto alla differenza delle stesse con la serie della stazione Portello. Le medie dei valori di temperatura minima per le tre stazioni, calcolate sul periodo febbraio-agosto, si attestano sui 15,1°C per Portello, 13,1 °C per Terre del fiume e 12,1 °C per Legnaro. Dunque la media per Portello risulta nettamente superiore rispetto a quelle di Terre del fiume e Legnaro (+2 °C e +3 °C rispettivamente), distanti tra loro un grado. Considerando i mesi JJA, i valori medi calcolati sono 21,6 °C per Portello, 19,5 °C per Legnaro e 18,6 °C a Terre del fiume. L'arrangiamento temporale delle variazioni positive e negative e dei picchi massimi e minimi delle tre curve è molto simile, sebbene

in termini di valori di temperatura vi siano delle differenze anche marcate tra le tre stazioni negli incrementi e nelle diminuzioni di temperatura durante medesimi giorni di misurazione.

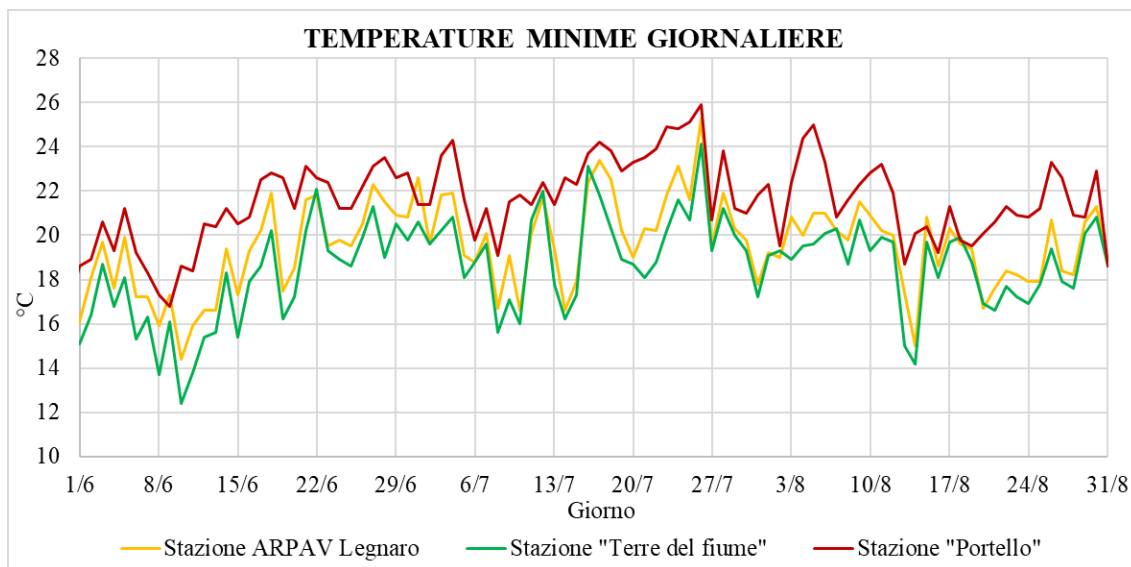


Figura 11 Temperature minime giornaliere dal 1 giugno al 31 agosto 2022

Il dettaglio dell'andamento delle temperature minime giornaliere dei mesi JJA aiuta ad evidenziare il distacco tra i valori registrati dalla stazione Portello e quelli registrati dalle altre due stazioni. In alcuni casi si raggiungono differenze nelle temperature minime tra la stazione Portello e le altre due stazioni che superano i 4 °C, anche fino a 6 °C. Le temperature minori dunque si sono manifestate nella località Basso Isonzo mantenendosi nella maggior parte dei giorni nell'intervallo 15 °C-20 °C. Le temperature minime più elevate, registrate dalla stazione Portello, hanno assunto valori compresi tra 20 °C e 25 °C nella maggior parte dei giorni esaminati.

Nel grafico di figura 12 che raffigura temperature massime giornaliere riferite al periodo 21 febbraio-30 agosto è possibile notare l'aumento di temperatura dovuto al ciclo delle stagioni, con valori che si mantengono prossimi ai 10 °C in febbraio e successivamente aumentano fino a rimanere, eccetto poche eccezioni, costantemente al di sopra dei 25 °C nei mesi di luglio e agosto. Dall'analisi delle tre curve si evince che la stazione Terre del fiume ha registrato i valori maggiori di temperatura, seguita da Portello e Legnaro. Tuttavia, le curve risultano molto più vicine tra loro rispetto al grafico delle temperature minime, dimostrando una minore differenza di valori rilevati, e mantengono comunque una visibile corrispondenza dei massimi e dei minimi. Per le tre stazioni sono state calcolate le medie delle temperature massime giornaliere da febbraio ad agosto, le quali risultano 25,3 °C per Terre del fiume, 24,6 °C per Portello e 23,8 °C per Legnaro. Per il periodo giugno-agosto esse assumono i valori di 32,2 °C a Terre del fiume, 31,6 °C a Portello e 30,5 °C a Legnaro. I valori medi non mantengono la stessa gerarchia del caso delle temperature massime e presentano una differenza meno

marcata tra di loro. Confrontando le curve delle tre stazioni con quella riferita al periodo 1992-2021 della serie storica ARPAV appare evidente la differenza in termini di valori di temperatura, notevolmente superiori nel 2022 rispetto alla media trentennale soprattutto a partire da maggio e durante i mesi JJA, eccetto alcuni intervalli temporali limitati.

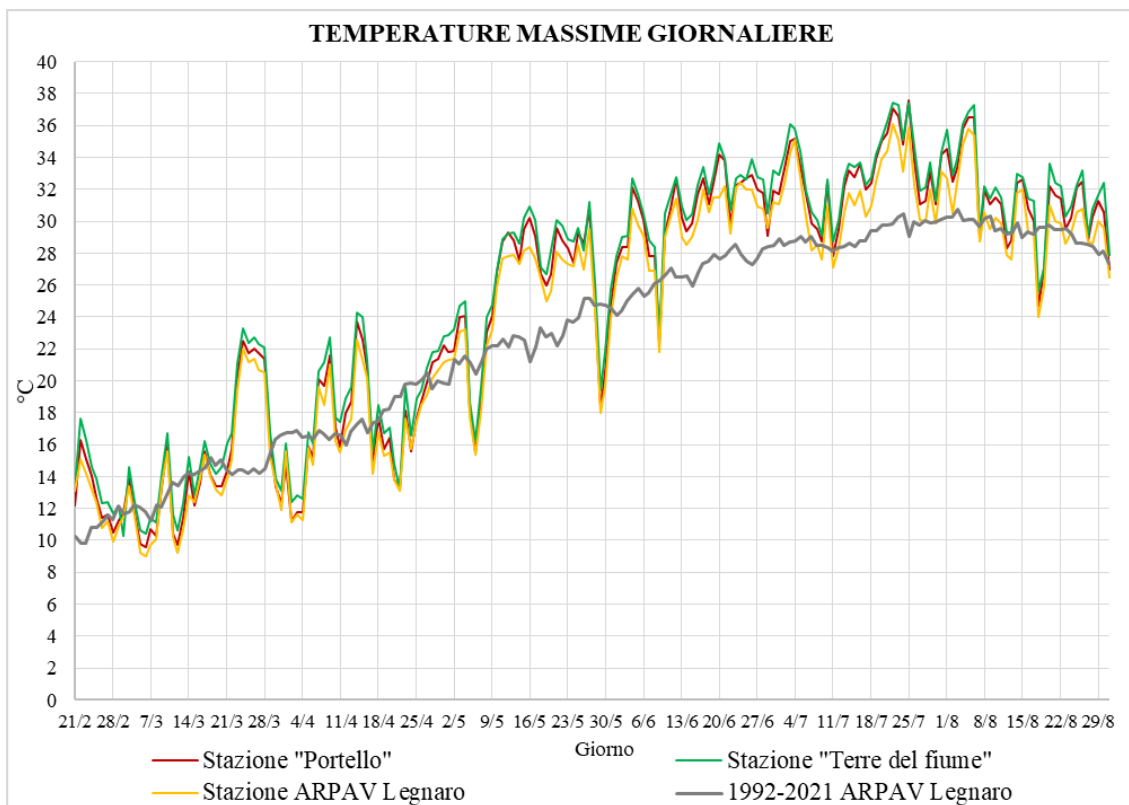


Figura 12 Temperature massime giornaliere dal 21 febbraio al 31 agosto 2022 per le tre stazioni considerate e confronto con la media dello stesso periodo per gli anni 1992-2021

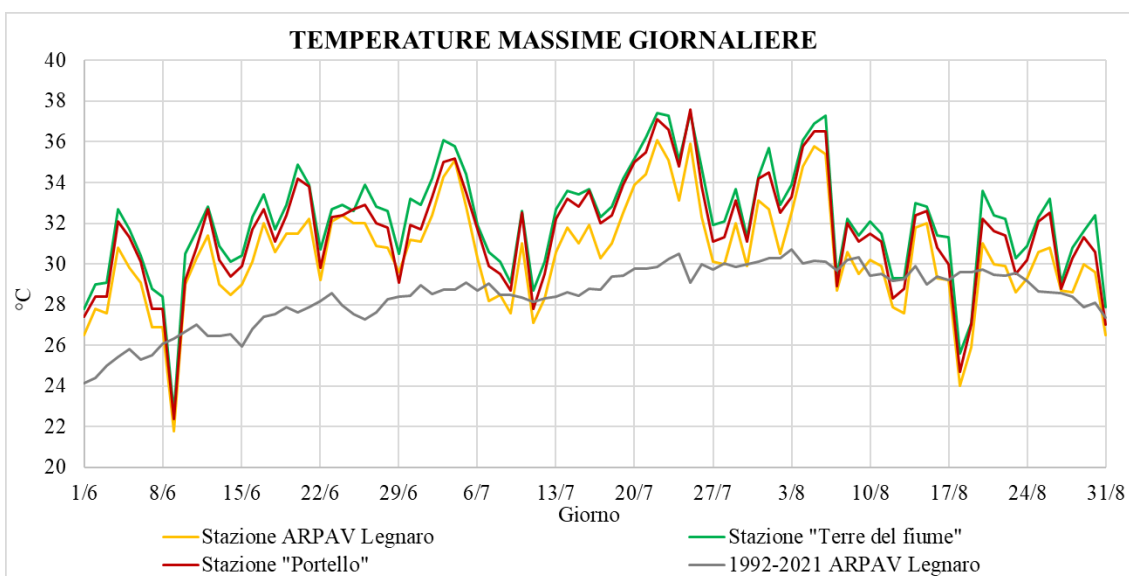


Figura 13 Temperature massime giornaliere per le tre stazioni considerate dal 1 giugno al 31 agosto 2022 e media dello stesso periodo per gli anni 1992-2021

Coerentemente con quanto anticipato dai grafici delle temperature minime e massime, la stazione Portello ha sperimentato per l'intera durata del periodo esaminato una temperatura giornaliera media maggiore rispetto alle altre due stazioni (figura 14). Le medie dei valori di temperatura media nel periodo febbraio-agosto risultano 20,1 °C a Portello, 18,9 °C a Terre del fiume e 18,8 °C a Legnaro. Relativamente ai mesi JJA, i valori medi si attestano su 26,7 °C per Portello, 25,5 °C per Terre del fiume e 25,1 °C per Legnaro. Si può osservare inoltre come Terre del fiume e Legnaro non mantengano tra di loro una gerarchia costante nel tempo ma si superino a vicenda in più punti, mantenendosi comunque sempre molto vicine. In particolare, esse indicano che nei mesi invernali e primaverili la stazione Legnaro ha registrato valori di temperatura mediamente maggiori rispetto a Terre del fiume, circostanza che si inverte nei mesi estivi in cui la curva verde sovrasta più spesso quella gialla. A fine comparativo, risulta significativo il confronto con le temperature medie delle tre stazioni per i sette mesi considerati con il valore medio dello stesso periodo ottenuto per il trentennio 1992-2021. In primo luogo, è interessante notare come la curva riferita alla serie 1992-2021 appaia molto più regolare rispetto alle curve delle tre stazioni in quanto la variabilità giornaliera dei valori di temperatura è mediata e ammortizzata su un dataset molto più numeroso. È poi possibile apprezzare delle differenze marcate in termini di valori di temperatura soprattutto a partire dal mese di maggio e per la maggior parte dei giorni dei mesi JJA.

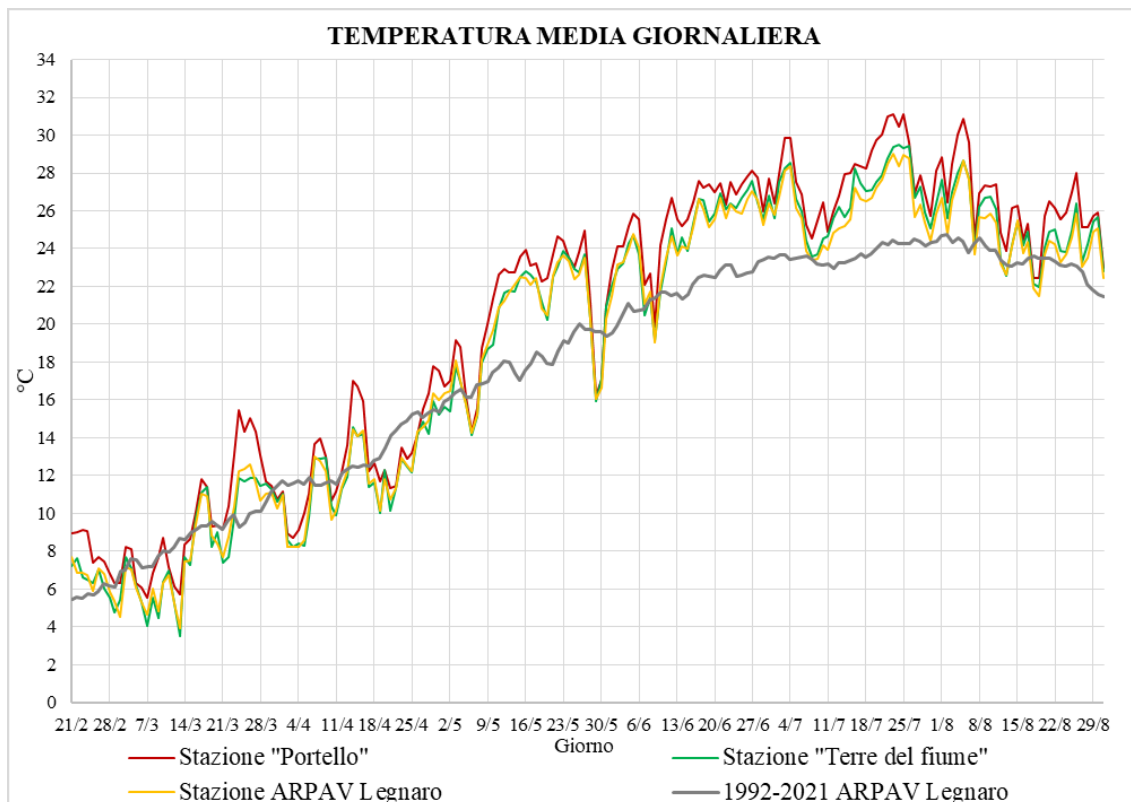


Figura 14 Temperature medie giornaliere dal 21 febbraio al 31 agosto 2022 per le tre stazioni considerate e confronto con la media dello stesso periodo per gli anni 1992-2021

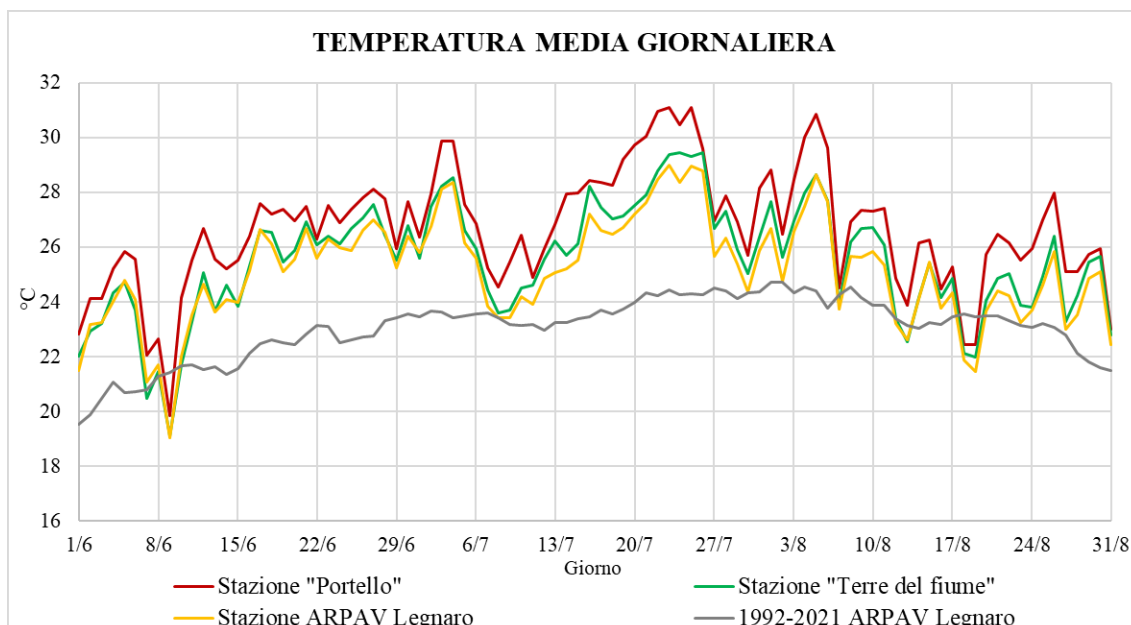


Figura 15 Temperature medie giornaliere dal 1 giugno al 31 agosto 2022 per le tre stazioni considerate e confronto con la media dello stesso periodo per gli anni 1992-2021

3.2 Hot days

Nel grafico di figura 16 sono raffigurati, sotto forma di pallini colorati, gli *hot days* registrati dalle tre stazioni, nei tre mesi JJA, rispetto al valore soglia di 30°C. La stazione che ha sperimentato il maggior numero di giorni con temperatura al di sopra dei 30 °C è stata Terre del fiume (82 giorni) seguita da Portello (70 giorni) e Legnaro (58 giorni), su un totale di 92 giorni di indagine. Osservando la distribuzione temporale degli *hot days* si può apprezzare una certa corrispondenza tra le tre stazioni dei periodi, più o meno duraturi, con una maggiore concentrazione di *hot days*, in particolare negli intervalli compresi tra il 16 giugno e il 6 luglio e tra il 13 luglio e il 6 agosto che presentano un'elevata numerosità dell'evento estremo per un periodo prolungato.

La diversa numerosità di *hot days* relativi alle tre stazioni si dimostra coerente con i risultati ricavati dall'analisi della temperatura dell'aria esterna. Infatti, la stazione Terre del fiume ha rilevato i valori più alti di temperatura durante i tre mesi estivi e per essa si è riscontrata una frequenza maggiore di *hot days*. Portello ha rilevato temperature massime giornaliere inferiori a Terre del fiume e relativamente ad essa gli *hot days* sono risultati meno numerosi. Infine, la stazione Legnaro che ha registrato i valori minori nell'ambito delle temperature massime, è anche quella che ha visto il manifestarsi di un minor numero di *hot days*.

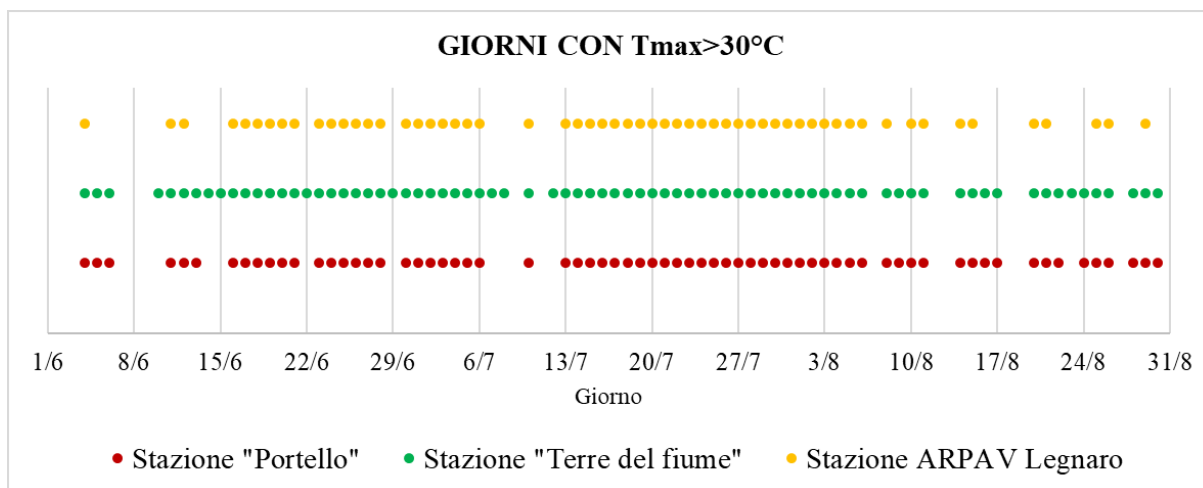


Figura 16 Hot days a 30°C verificatisi dal 1 giugno al 31 agosto 2022 (1 pallino = 1 hot day). In questo caso, sono considerati hot days i giorni in cui la temperatura dell'aria esterna ha superato i 30°C

Rispetto al valore soglia di 32 °C (figura 17), la stazione che ha registrato il maggior numero di hot days risulta sempre Terre del fiume (52 giorni), seguita da Portello (43 giorni) e Legnaro (28 giorni). Il numero di hot days per ciascuna stazione è dunque logicamente inferiore rispetto al caso di valore soglia di 30 °C e la maggior frequenza dell'evento si è avuta sempre presso Terre del fiume. La concentrazione maggiore di hot days a 32 °C si è verificata negli stessi giorni con alta frequenza di hot days a 30 °C.

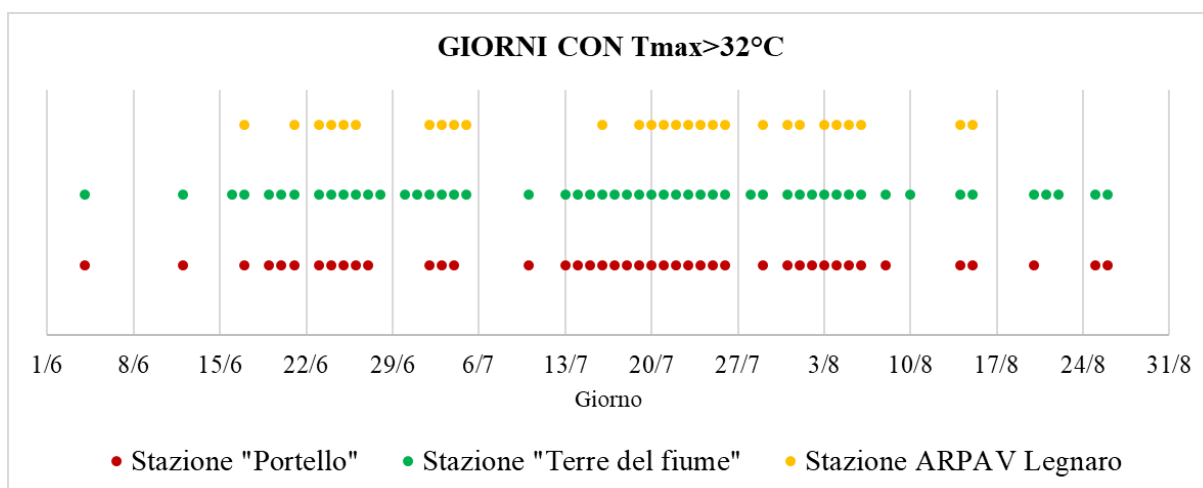


Figura 17 Hot days a 32°C verificatisi dal 1 giugno al 31 agosto 2022 (1 pallino = 1 hot day). In questo caso, sono considerati hot days i giorni in cui la temperatura dell'aria esterna ha superato i 32 °C

3.3 Ondate di calore e HWMId

La distribuzione temporale delle ondate di calore e dei giorni che le compongono è riportata nel grafico in figura 18, relativamente al settore in cui opera la stazione meteorologica Legnaro, con

riferimento ai mesi di maggio, giugno, luglio e agosto del 2022. Nonostante l'analisi delle ondate di calore venga tipicamente effettuata considerando i mesi estivi JJA, come si può notare dal grafico la prima nonché più lunga ondata si è manifestata a metà maggio, con 7 giorni di ondata a partire dall'11 maggio. In seguito hanno avuto luogo altre quattro ondate, rispettivamente di 4 giorni a partire dal 23 giugno, 4 giorni dal 2 luglio, 4 giorni dal 20 luglio e infine 3 giorni a partire dal 4 agosto. Le ondate di calore estive, inoltre, hanno avuto luogo nelle medesime finestre temporali durante le quali si è avuta la maggiore frequenza degli *hot days*, confermando dunque la condizione di caldo estremo verificatasi in tali periodi. L'ondata di maggio, grazie alla lunga durata di sette giorni, risulta quella con la maggior magnitudo tra le quattro (7,97), seguita dalle due ondate di luglio (6,45 e 6,12), dall'ondata di giugno (5,71) e infine da quella di agosto (4,93). È evidente, dunque, che la magnitudo complessiva di un'ondata di calore sia influenzata dalla sua stessa durata, per definizione. Tuttavia, se si considerano le maggiori magnitudo dei singoli giorni di ondata di calore, risulta che il valore più elevato appartenga alla quarta ondata (1,70). Inoltre, è interessante notare come la magnitudo giornaliera media sia aumentata ad ogni ondata successiva, infatti si ottiene una magnitudo media di 1,64 per l'ondata di agosto, contro una media di 1,14 dell'ondata di maggio.

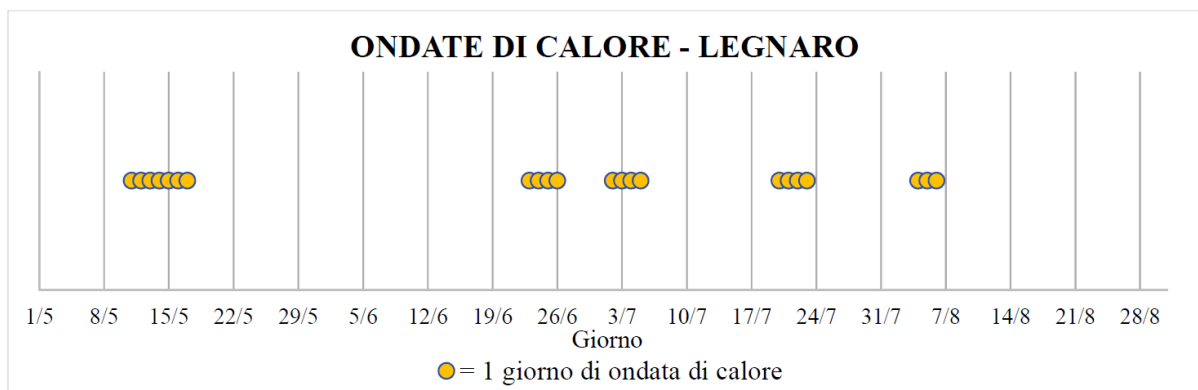


Figura 18 Giorni di ondata di calore tra il 1 maggio e il 31 agosto 2022 - Stazione Legnaro. Sono considerate ondate di calore i periodi di almeno tre giorni consecutivi che soddisfano le condizioni di Russo et al.(2014) per tale evento estremo

Heatwave	Inizio	Fine	Durata	HWMId	M massima	M media
1	11/05	17/05	7 giorni	7,97	1,18	1,14
2	23/06	26/06	4 giorni	5,71	1,45	1,43
3	02/07	05/07	4 giorni	6,12	1,63	1,53
4	20/07	23/07	4 giorni	6,45	1,70	1,61
5	04/08	06/08	3 giorni	4,93	1,68	1,64

3.4 Heat Index

Il periodo per cui si è calcolato l'*Heat Index* comprende i tre mesi JJA canonici per lo studio di questo parametro. L'andamento temporale dei valori massimi giornalieri dello HI è rappresentato nel grafico di figura 19, con tre curve relative alle tre stazioni. Eccetto due giorni di eccezione, l'indice di calore è rimasto continuamente al di sopra della soglia dei 27 °C per tutto il periodo considerato in tutte e tre le stazioni. Tale valore di temperatura è il primo che rientra, nella tabella dei valori critici di HI costruita dalla NOAA, nell'intervallo che rappresenta la condizione di possibile rischio per la salute umana in caso di esposizione prolungata e attività fisica intensa. Si è riscontrato che le curve rappresentative delle stazioni Portello e Terre del fiume si mantengono sempre vicine e spesso sovrapposte, presentando valori di HI visivamente maggiori rispetto alla stazione Legnaro. In particolare, nelle finestre temporali dal 18 giugno al 7 luglio dal 13 luglio al 7 agosto risultate critiche anche nell'analisi di *hot days* e ondate di calore, esse assumono valori costantemente al di sopra dei 32 °C, rientrando dunque nell'intervallo relativo alla condizione di rischio medio-alto di incorrere in malori, crampi e attacchi cardiaci in caso di lunga esposizione e attività intensa. Il valore maggiore di HI si è verificato nella stazione Portello il 25 luglio, raggiungendo i 40 °C. Nella stessa data, anche Terre del fiume e Legnaro hanno fatto registrare il loro picco massimo di HI, con una temperatura rispettivamente di 39 °C e 37 °C. In corrispondenza delle giornate di ondata di calore precedentemente descritte, si sono verificati variazioni positive del HI in tutte le stazioni ed in particolare, durante l'ondata di agosto, Terre del fiume e Legnaro si è calcolato il massimo valore di HI. Le medie aritmetiche dei valori massimi giornalieri di *Heat Index* sono 32,1 °C per Portello, 32,4 °C per Terre del fiume e 30,7 °C per Legnaro. Le curve del HI relative alle stazioni Portello e Terre del fiume risultano quasi identiche grazie al fatto che esse hanno registrato valori massimi di temperatura e di umidità relativa molto simili. Legnaro, che comunque è risultata avere rilevato le temperature giornaliere massime più basse, ha risentito anche di una condizione di umidità inferiore alle altre due stazioni, comportando una differenza di HI massimo con Portello e Terre del fiume molto più evidente.

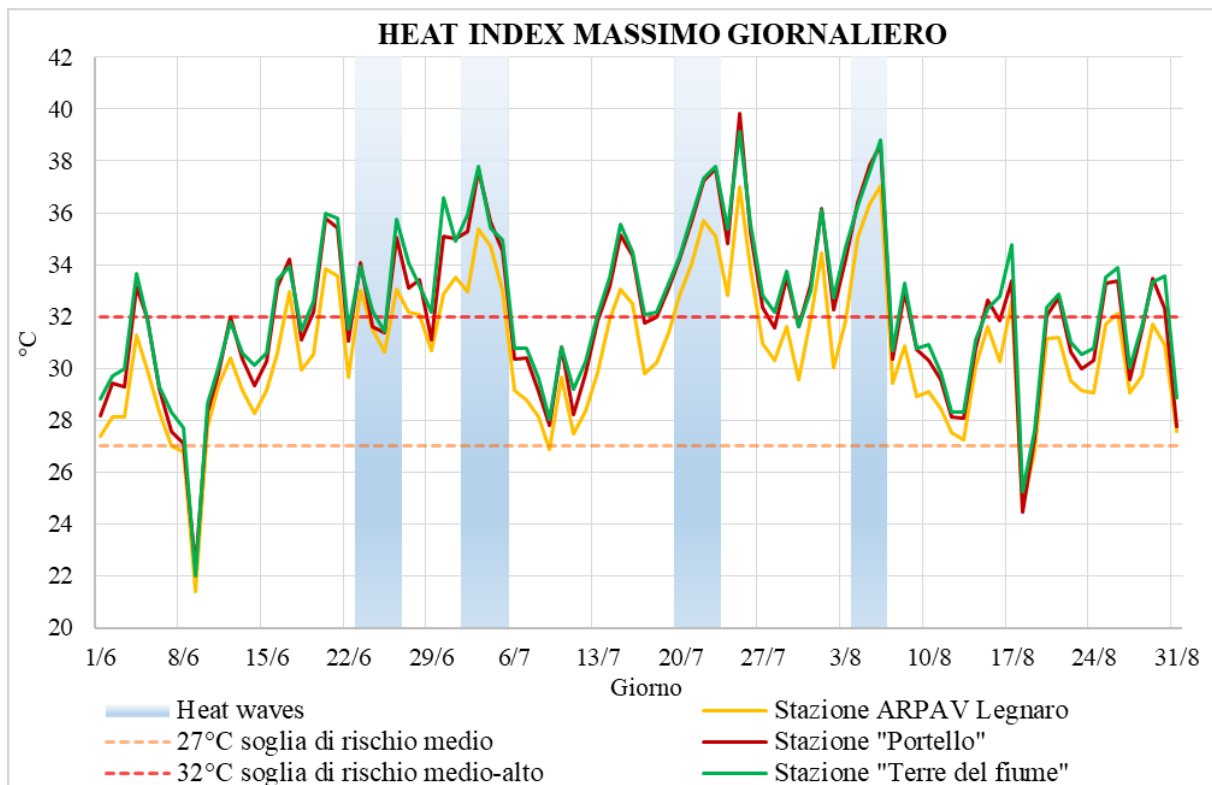


Figura 19 Andamento dei valori giornalieri massimi di HI dal 1 giugno al 31 agosto 2022. L'Heat Index temperatura dell'aria e umidità per stimare il valore di temperatura percepita dalle persone e il relativo livello di comfort termico

3.5 Notti tropicali

Per quanto riguarda il fenomeno delle notti tropicali, il periodo di indagine ha compreso i tre mesi JJA, per un totale di 92 giorni di osservazioni. Come riportato dal grafico di figura 20, risulta che la stazione Portello abbia registrato un numero complessivo di notti tropicali (76) notevolmente maggiore rispetto alle altre stazioni Terre del fiume e Legnaro (23 e 43 rispettivamente). Nella stazione urbana, infatti, questo evento estremo si è manifestato quasi ininterrottamente durante tutti e tre i mesi estivi mentre appare più frammentaria la distribuzione temporale delle notti tropicali rilevate dalle altre due stazioni, per le quali si può osservare una maggiore numerosità del fenomeno in più intervalli temporali distinti e di breve durata.

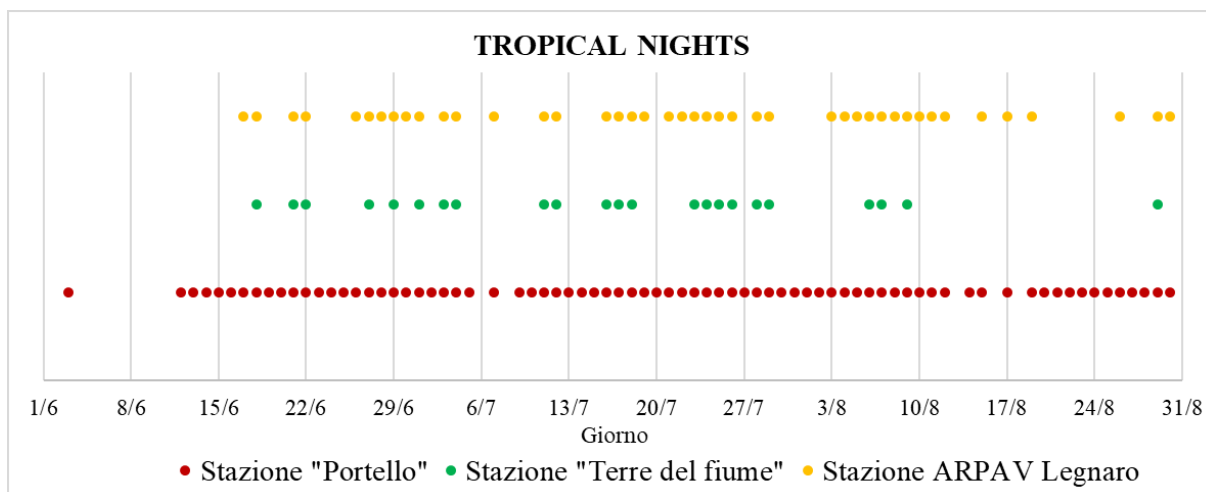


Figura 20 Distribuzione temporale per le tre stazioni delle notti tropicali dal 1 giugno al 31 agosto 2022 (1 pallino=1 notte tropicale). Durante le notti tropicali la temperatura minima non scende sotto i 20 °C

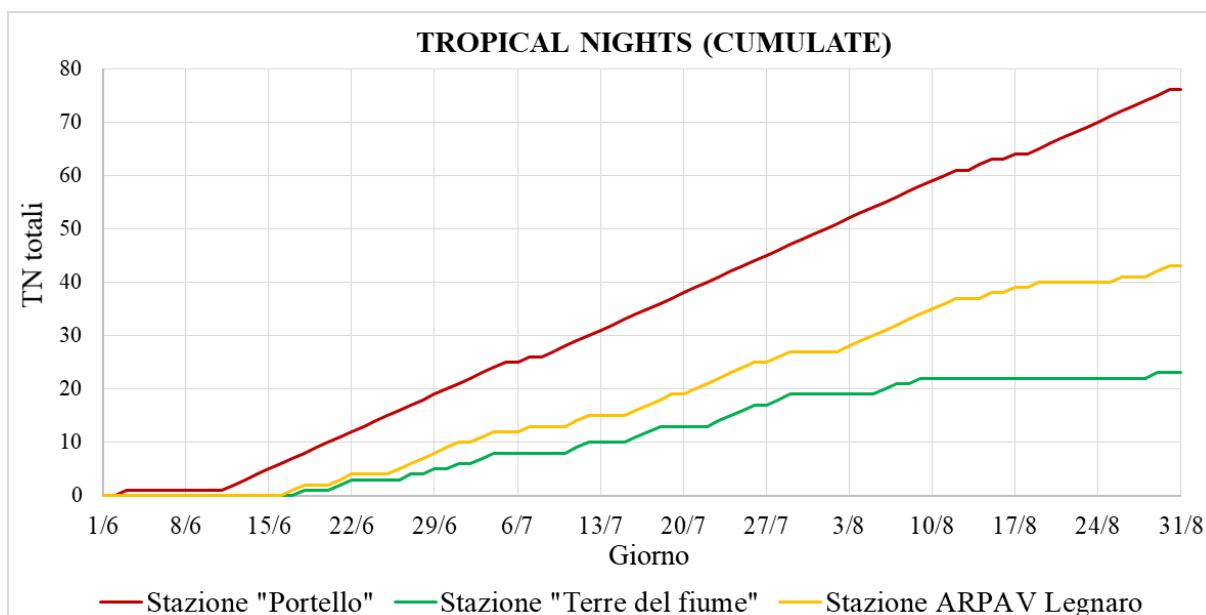


Figura 21 Notti tropicali totali per ciascuna stazione dal 1 giugno al 31 agosto 2022

3.6 Discussione sui risultati

3.6.1 Temperatura ed eventi estremi

Grazie all'elaborazione dei dati raccolti dalle tre stazioni meteorologiche è stato possibile valutare la presenza e l'importanza di alcuni eventi meteorologici estremi legati alla temperatura (*hot days*, notti tropicali e ondate di calore) che hanno avuto luogo a Padova. In particolare, lo scopo dello studio è stato quello di scoprire eventuali differenze nei dati rilevati dalle tre stazioni.

Considerando i valori di temperatura dell'aria esterna in modo assoluto, sono state scoperte alcune relazioni notevoli tra le tre stazioni. Le massime temperature sono state registrate da Terre del fiume, che ha rilevato anche le temperature minime più basse. Le minime di Terre del fiume sono risultate mediamente inferiori di 1 °C a quelle di Legnaro e di 2 °C a quelle di Portello, mentre le massime sono state mediamente superiori di 0,7 °C e 1,5 °C a quelle di Portello e Legnaro rispettivamente. La stazione con la temperatura media maggiore è risultata essere Portello, grazie al fatto di avere rilevato temperature minime notevolmente superiori alle altre due stazioni e temperature massime relativamente non molto distanti da quelle di Terre del fiume. La temperatura media calcolata per Portello è superiore di poco più di 1 °C a quelle di Terre del fiume e Legnaro per le quali è stato calcolato un valore medio pressoché identico, differente solo di 0,1 °C. Dal confronto con la serie storica ARPAV è emerso inoltre che soprattutto nei mesi estivi del 2022 si sono verificate delle condizioni di temperatura anomale rispetto alla media 1992-2021. Tra maggio e agosto sia le temperature giornaliere massime che quelle medie hanno assunto valori notevolmente maggiori rispetto alla media trentennale rispecchiando la condizione di eccezionalità dell'estate 2022. Il mese con le temperature più alte è stato luglio, che ha visto anche la maggior frequenza di notti tropicali. *hot days* e valori critici di *Heat Index*.

I risultati ottenuti dall'analisi della temperatura sono coerenti con quelli ottenuti dallo studio degli eventi estremi ad essa correlati. Le alte temperature registrate a Terre del fiume e in Portello hanno determinato per esse una maggior frequenza di *hot days* a 30 °C e 32 °C. Considerando i mesi JJA, sono stati superati i 30 °C per più della metà dei giorni in tutte e tre le stazioni. I valori di *Heat Index* di Portello e Terre del fiume sono stati spesso simili e continuativamente al di sopra della soglia di rischio medio per il benessere della popolazione durante i mesi JJA, mentre hanno superato il limite di rischio medio-alto negli stessi periodi in cui sono state rilevate le ondate di calore a Legnaro. Infine, le temperature minime notevolmente più alte rispetto alle altre due stazioni hanno fatto sì che per Portello il fenomeno delle notti tropicali abbia avuto luogo quasi ininterrottamente nei mesi JJA. Eventi estremi e indici termici hanno assunto maggiore frequenza e magnitudo soprattutto in due finestre temporali distinte all'interno dei tre mesi estivi, dal 15 giugno al 5 luglio e dal 20 luglio al 5

agosto. Relativamente alla stazione di Legnaro, cinque ondate di calore a di almeno tre giorni hanno avuto luogo tra maggio e agosto con una magnitudo media crescente ad ogni ondata successiva.

Nonostante le tre stazioni abbiano rivelato alcune differenze in termini di valori di temperatura, si è notata una certa corrispondenza nell'arrangiamento temporale delle loro variazioni sia positive che negative nonché dei picchi massimi e minimi. La distanza spaziale tra le tre stazioni, infatti, non è tale da comportarvi la presenza di specifiche condizioni differenti da un punto di vista climatico. Difatti, come è possibile osservare dai grafici, le curve degli andamenti della temperatura risultano molto simili, seppure posizionate su valori diversi. Inoltre, *hot days* e notti tropicali hanno assunto una maggiore frequenza negli stessi intervalli di giorni in tutte le stazioni, così come l'*Heat Index* relativo a ciascuna stazione ha dimostrato variazioni più o meno importanti in maniera simultanea.

3.6.2 L'isola di calore urbana nella città di Padova

Se dunque la variabilità non è sufficiente per giustificare le differenze in termini di valori di temperatura grazie alla relativa vicinanza tra le tre stazioni, le cause di questo comportamento sono da ricercare in altri fattori. Diversi studi hanno dimostrato come le caratteristiche morfologiche di un territorio antropizzato influenzino in modo non trascurabile le dinamiche climatiche al suo interno, dando luogo a veri e propri microclimi urbani (Kleerekoper et al., 2012; Pearlmutter et al., 2017; Balany et al., 2020). La differenza più marcata si nota generalmente ponendo a confronto un centro urbano con la periferia. Il primo è tipicamente caratterizzato da un'alta densità costruttiva, pavimentazioni artificiali, strade asfaltate e presenza di veicoli a motore mentre nella parte più esterna al centro abitato solitamente resistono aree verdi e vegetazione e le strutture artificiali sono meno diffuse. Tra le conseguenze ambientali più rilevanti dell'urbanizzazione vi è la tendenza della temperatura ad assumere valori più elevati all'interno della città rispetto alla parte rurale, dando origine al fenomeno climatico localizzato dell'isola di calore urbana. Con l'aumento del consumo di suolo urbano e della temperatura media globale, questo fenomeno si verifica e viene percepito sempre più spesso e sperimentalmente è stato osservato soprattutto nei mesi estivi e nelle ore notturne, in cui la temperatura tende a rimanere spesso elevata (Perini et al., 2014).

Le differenze in termini di temperatura notate tra la stazione Portello e le altre due stazioni possono ragionevolmente essere ricondotte proprio al fenomeno dell'isola di calore. Portello, infatti, è risultata la stazione mediamente più calda delle tre soprattutto grazie alle sue temperature minime notevolmente più alte. Le due stazioni rurali, invece, hanno presentato condizioni di temperatura mediamente molto simili tra loro e inferiori a Portello in termini di valori. L'esistenza dell'isola di calore urbana nel quartiere Portello sarebbe dovuta alla densità di edificazione e di cementificazione del territorio circostante alla stazione. Da un lato, infatti, i materiali da costruzione più diffusi come

asfalto e cemento possiedono un'elevata capacità di immagazzinamento del calore che unita alla loro inerzia termica comportano l'accumulo di calore durante il giorno che poi viene rilasciato nelle ore notturne in cui la temperatura dell'aria esterna tende a diminuire. A conferma di questo fenomeno vi è il relativamente piccolo sbalzo termico rilevato da Portello tra le temperature massime e minime giornaliere e la quasi ininterrotta presenza di notti tropicali durante i mesi estivi. In secondo luogo, edifici, strade e pavimentazioni sono generalmente caratterizzati da colorazioni scure ad albedo bassa che permette una ridotta riflessione della radiazione solare, intensificando l'accumulo di calore durante il giorno. Altri fattori che possono contribuire all'isola di calore urbana sono la molteplice riflessione della radiazione solare all'interno dei corridoi delimitati dai volumi degli edifici (canyon urbani) e il conseguente intrappolamento di energia termica, la presenza di attività antropiche che utilizzano processi di combustione esotermici come i veicoli a motore e il rilascio nell'ambiente esterno di calore di scarto da parte degli impianti di condizionamento, impiegati soprattutto durante i mesi più caldi, considerati in questo studio.

La presenza di un'isola di calore nel settore operativo della stazione Portello potrebbe suggerire che qui si debbano registrare le massime temperature confrontate con Terre del fiume e Legnaro. In realtà, come dimostrato dai dati raccolti, non è stato così e le temperature più alte sono state rilevate presso Terre del fiume. Quella che può sembrare un'anomalia si può spiegare con il fatto che l'isola di calore si rende evidente soprattutto durante le ore notturne in cui la temperatura dell'aria tende a diminuire e per ragioni termodinamiche i materiali e le superfici artificiali che hanno accumulato calore durante il giorno lo riemettono, contrastando la diminuzione della temperatura dell'aria. In secondo luogo, è plausibile che la presenza del corridoio fluviale del canale Piovego abbia influenzato le dinamiche termiche dell'area prossima alla stazione Portello limitando l'aumento della temperatura dell'aria durante le ore diurne. I corpi idrici, infatti, assorbono parte dell'energia dovuta alla radiazione solare e la convertono in calore latente di evaporazione, determinando un significativo effetto di raffrescamento dell'ambiente circostante, ancora più rilevante nel caso di una massa d'acqua in movimento come il canale, che trasferisce con sé parte del calore accumulato.

3.6.3 Mitigazione e adattamento al cambiamento climatico nel contesto urbano

Tra le conseguenze del cambiamento climatico terrestre riconosciute dall'IPCC, vi sarà l'aumento di frequenza e severità di eventi estremi legati alla temperatura come ondate di calore, siccità e incendi e il continente europeo, soprattutto nell'area mediterranea, risulterà essere un *hotspot* di questa problematica (IPCC AR6, 2021). Il peggioramento delle condizioni climatiche in aree geografiche già densamente abitate e che probabilmente subiranno un'ulteriore processo di popolamento, hanno

aumentato l'interesse nella ricerca di possibili politiche e soluzioni per la mitigazione e l'adattamento al cambiamento del clima in ambito urbano.

Diversi studi hanno individuato significativi benefici ambientali per il miglioramento del comfort termico nelle cosiddette *nature based solutions*. Le *nature based solutions* consistono in approcci e azioni ispirati dal mondo naturale per affrontare il mutamento del clima e proteggere il benessere della popolazione. Se, infatti, il fenomeno dell'isola di calore urbana è dovuto in primo luogo all'intensa antropizzazione del territorio della città, può risultare cruciale l'inserimento di infrastrutture verdi come parchi, vie alberate, giardini verticali, e *green roofs* che contribuiscano alla mitigazione dell'isola di calore non solo localmente nelle aree vegetate ma anche in modo più esteso nell'ambiente edificato in loro prossimità (Lobaccaro et al., 2015). L'abbassamento della temperatura dell'aria può essere avvertito con maggiore efficacia nei mesi caldi, durante i quali i processi vitali della vegetazione sono al loro apice, ed è dovuto a diversi fattori: la cattura di energia termica sotto forma di calore latente nel processo di evapotraspirazione delle piante e la conseguente rimozione di calore sensibile dall'ambiente, l'ombreggiamento generato dal fogliame e dai volumi delle piante, che offrendo uno schermo dall'irraggiamento solare oltre a offrire riparo alla popolazione, nel caso di giardini verticali e *green roofs* permette di ridurre la necessità di climatizzazione degli ambienti interni e il conseguente rilascio di ulteriore calore di scarto che come un circolo vizioso incentiverebbe l'aumento di temperatura all'esterno. L'inserimento ed il mantenimento di aree verdi all'interno delle città aiuta inoltre a contrastare il consumo e la cementificazione del suolo, problema già molto diffuso e in continua espansione nella pianura veneta, e grazie alla loro maggiore permeabilità e ridotta conducibilità idraulica in confronto alle superfici artificiali consentono di rallentare e controllare gli afflussi alla rete di fognatura durante severi eventi di precipitazione. Infine, rappresenterebbero un valido ausilio al miglioramento della qualità dell'aria tramite filtraggio e cattura di anidride carbonica.

Altri metodi non *nature based* risultati rilevanti nella mitigazione delle isole di calore urbane riguardano le caratteristiche dei materiali di copertura delle superfici e la morfologia dell'ambiente urbano. Poiché, infatti, tetti, piazze e strade ricoprono generalmente la maggior parte della superficie esposta alla radiazione solare, l'utilizzo nella loro costruzione di materiali a basso accumulo di calore coadiuvato da un'alta albedo possono contribuire in modo significativo nel ridurre il ristagno di energia termica, contrastando l'aumento della temperatura superficiale dell'aria. Nonostante nel caso di insediamenti urbani di antica costruzione come la città di Padova risulti meno conveniente e praticabile operare delle modifiche alla morfologia dell'ambiente edificato, altre soluzioni ingegneristiche adottabili per mitigare il fenomeno dell'isola di calore possono essere l'aumento del rapporto altezza-larghezza dei canyon urbani per un maggiore effetto ombreggiamento a livello

pedonale, anche se non è da trascurare il fatto che la particolare geometria dei canyon possa ostacolare l'aerazione e lo spostamento delle masse di aria negli stessi intrappolando calore e peggiorando la qualità dell'aria. Infine, è stato rilevato che anche l'orientamento degli assi stradali all'interno delle città riveste un ruolo importante nelle dinamiche microclimatiche urbane. In questo caso, l'esposizione alla radiazione solare che non è costante nell'arco della giornata per le strade con diverso orientamento fa sì che gli assi stradali con direzione est-ovest risentano maggiormente in termini di aumento di temperatura dell'esposizione solare, soprattutto durante il primo mattino e il tardo pomeriggio (Balany et al., 2020).

L'adozione di misure *nature based* per la mitigazione delle isole di calore potrebbe dunque rivelarsi interessante ed efficace anche nel caso della città di Padova. È molto probabile, infatti, che il fenomeno dell'isola di calore non sia circoscritto all'area ristretta in cui opera la stazione Portello ma sia presente in più zone della città date le sue caratteristiche morfologiche e strutturali. A questo proposito, diventerebbe molto utile e importante l'installazione di ulteriori stazioni meteorologiche nel territorio urbano di Padova per comprendere meglio la distribuzione e l'intensità delle isole di calore e di conseguenza rendere più mirata ed efficiente la progettazione di misure di mitigazione. L'inserimento di coperture erbose e la piantumazione di alberi rappresentano un intervento relativamente poco invasivo rispetto ad una completa revisione e trasformazione del tessuto urbano, e se progettate in modo intelligente potrebbero diventare degli invitanti spazi di aggregazione per i cittadini e migliorare l'immagine della città comportando benefici sia sociali che economici e facilitando il raggiungimento degli obiettivi di sostenibilità ed inclusività.

4 CONCLUSIONI

Il 2022 è stato segnato in Italia e in Europa da condizioni di temperatura anomale. Secondo l'European Centre for Medium-Range Weather Forecast (ECMWF), l'estate 2022 è risultata a livello europeo la più calda mai registrata, con temperature al di sopra della media del periodo 1991-2020 in tutto il continente. La scienziata del Copernicus Climate Change Service, Freja Vamborg, ha affermato che “una serie intensa di ondate di calore in Europa accompagnata da inusuali condizioni di siccità, hanno condotto a un'estate di estremi con record in termini di temperatura, siccità e attività di incendi in molte parti d'Europa, coinvolgendo la società e l'ambiente naturale in diversi modi. I dati del Copernicus Climate Change Service mostrano che in Europa non solo in agosto si sono registrate temperature record ma anche nell'intera estate, col precedente record estivo più vecchio di un solo anno” (CCCS, 2022).

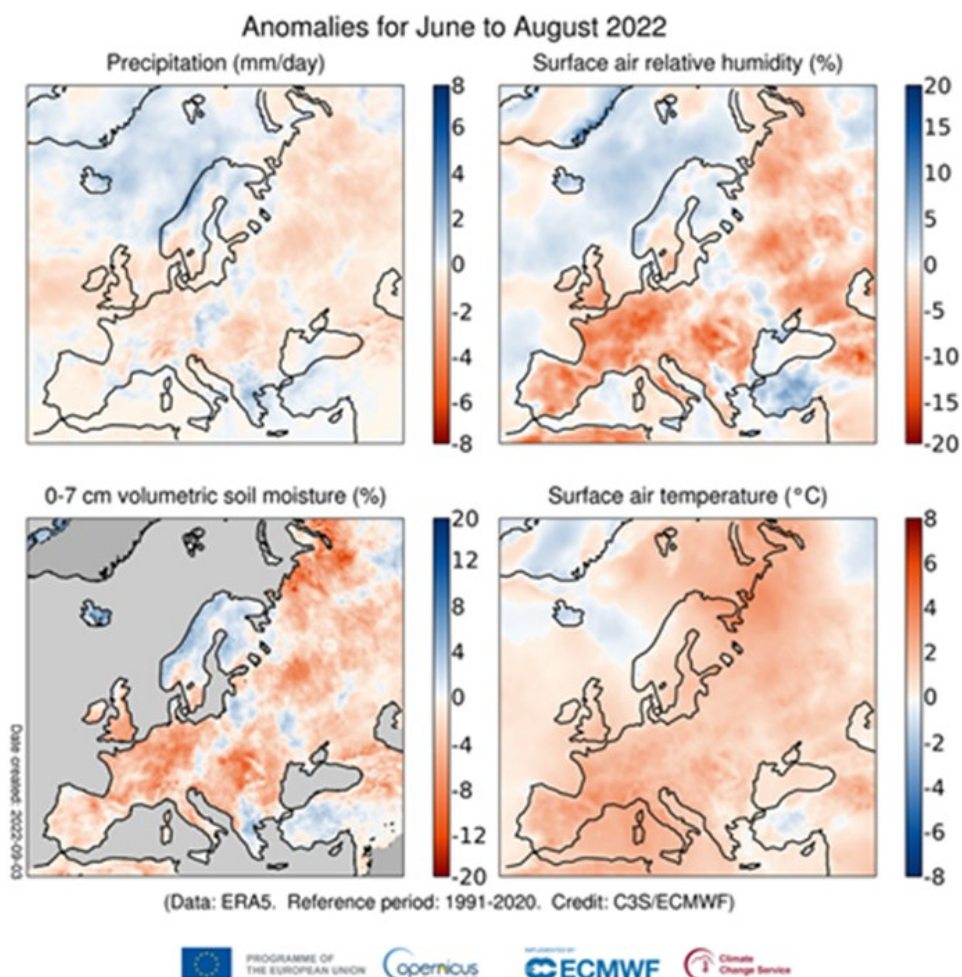


Figura 22 Anomalie di precipitazione, umidità relativa dell'aria, umidità del suolo e temperatura dell'aria nei mesi di giugno, luglio e agosto del 2022 (CCCS)

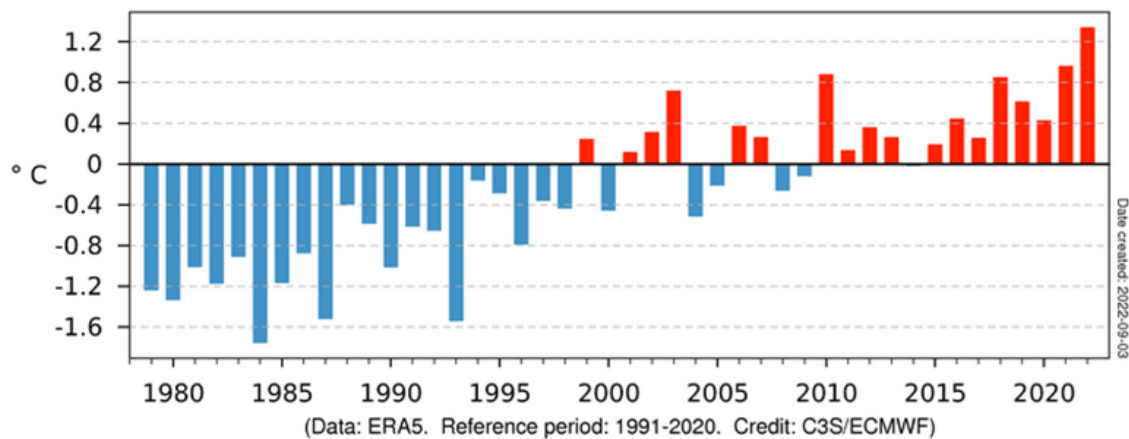


Figura 23 Anomalia di temperatura superficiale in Europa nei mesi JJA rispetto al periodo di riferimento 1991-2020 (CCCS)

Le alte temperature estive hanno comportato il manifestarsi di eventi meteo climatici estremi quali *hot days*, notti tropicali e ondate di calore. Nel caso della città di Padova, grazie ai dati rilevati da tre stazioni meteorologiche situate in contesti ambientali diversi, è stato possibile valutare la presenza di tali eventi estremi e la severità di alcuni valori indice di benessere termico per la popolazione. È emerso che *hot days* e notti tropicali hanno avuto luogo nella maggior parte dei giorni dei mesi JJA, assieme a cinque ondate di calore a tre giorni. Inoltre, la combinazione di temperatura e umidità dell'aria ha comportato valori di temperatura percepita (*Heat Index*) indice di possibile disagio fisico e pericolo per la salute della popolazione. Nonostante le temperature giornaliere massime siano state registrate nella stazione periferica Terre del fiume, la stazione mediamente più calda è stata quella urbana Portello, anche grazie alle sue temperature minime notevolmente maggiori rispetto alle altre due stazioni. Questo fatto è molto probabilmente dovuto alla presenza di un'isola di calore urbana nel settore in cui la stazione Portello è installata. L'isola di calore urbana è causata dall'alterazione dell'ambiente naturale tramite edificazione, impermeabilizzazione del suolo, utilizzo di materiali ad alta capacità termica e dalla massiccia presenza di veicoli, impianti di climatizzazione e attività industriali.

In previsione di un peggioramento del comfort termico nelle aree urbane dovuto all'aggravarsi del cambiamento climatico unito alla crescente urbanizzazione, sono stati condotti numerosi studi su possibili interventi di miglioramento delle condizioni ambientali nelle città i quali nella maggior parte hanno riscontrato come l'aumento della presenza di infrastrutture verdi e *nature based* come parchi, alberi, superfici erbose unita all'utilizzo di materiali che riflettono maggiormente la radiazione solare e accumulano meno calore contribuiscano alla diminuzione della temperatura dell'ambiente urbano rendendolo così più confortevole e vivibile per la popolazione soprattutto durante i mesi più caldi.

Un piano di adattamento al cambiamento climatico in ambito urbano che includa l'inserimento di opere verdi all'interno della città di Padova potrà dunque rivelarsi utile nella mitigazione del fenomeno dell'isola di calore urbana in previsione di un aumento in frequenza e severità di eventi meteo-climatici estremi come ondate di calore, *hot days* e notti tropicali e nell'ottica di raggiungere l'obiettivo di città sostenibile, inclusiva e resiliente ai cambiamenti climatici.

Approfondimento

Le *warming stripes*, introdotte nel 2018 dal climatologo dell'università di Reading Ed Hawkins, sono un tipo di grafico a bande verticali colorate, disposte in ordine cronologico, che rappresentano lo scostamento dal valore medio di un periodo riferimento (baseline) a seconda della loro sfumatura. Originariamente, le *warming stripes* sono state utilizzate per raffigurare in modo semplice e intuitivo l'anomalia della temperatura media globale per ogni anno a partire dal 1850 fino al 2018, rispetto al valore medio del periodo complessivo, utilizzando i colori blu e rosso per i maggiori valori di anomalia negativa e positiva rispettivamente, assieme alle relative sfumature per i casi intermedi. L'approccio delle *warming stripes* si è rivelato molto efficace ed è adattabile alla rappresentazione di variabili diverse dalla temperatura, per cui si disponga su una serie di riferimento abbastanza numerosa.

In questo studio, a partire dalle misurazioni di temperatura dal 1992 al 2022 è stato prodotto un grafico con le *warming stripes* per la stazione di Legnaro, in cui il colore di ciascuna banda verticale rappresenta per ogni anno consecutivo l'entità dello scostamento del valore di temperatura media annuale dalla media del periodo di riferimento. A prima vista si può notare come il grafico appaia diviso in due parti, una sinistra in cui predominano le sfumature di blu e una destra dove prevale il rosso. Ciò significa che, relativamente alla stazione di Legnaro, la temperatura media degli ultimi 12 anni è stata superiore alla media 1992-2022. In particolare, il 2022 è risultato essere l'anno mediamente più caldo nel trentennio 1992-2022, con un'anomalia di +1,2 °C.

L'ISPRA (Istituto Superiore per la Ricerca e la Protezione Ambientale) ha prodotto le *warming stripes* per l'Italia con baseline 1992-2022. Anche in questo caso la parte sinistra del grafico presenta una maggior concentrazione di bande blu mentre a destra le bande rosse sono prevalenti. Anche su scala nazionale si è assistito dunque ad un aumento della temperatura media annuale soprattutto negli ultimi 20 anni e il 2022 è risultato l'anno più caldo dal 1992 con un'anomalia di +1 °C.

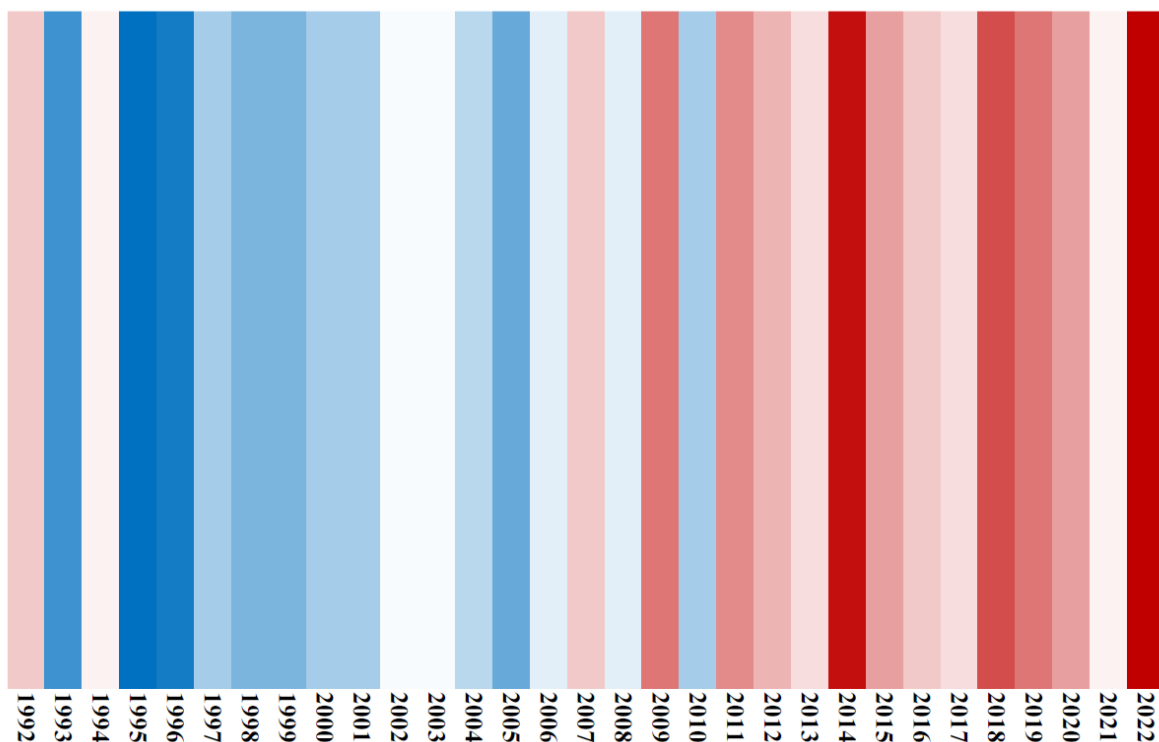


Figura 24 Warming stripes per la stazione di Legnaro su baseline 1992-2022 (elaborazione dati ARPAV)

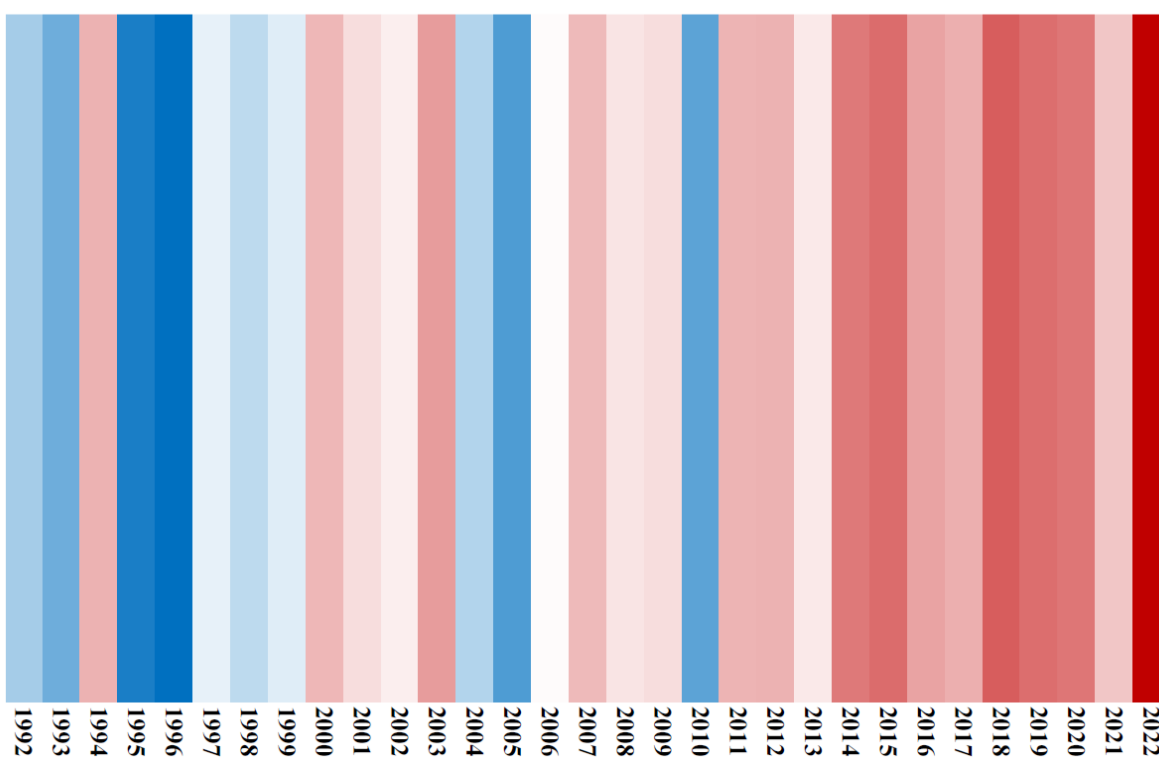


Figura 25 Warming stripes per l'Italia su baseline 1992-2022 (ISPRA)

BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA

- Agenzia Regionale per la Protezione Ambientale del Veneto. *arpa.veneto.it*
- Balany et al., 2020. Green infrastructure as an urban heat island mitigation strategy. *mdpi.com*
- Copernicus Climate Change Service, 2022. Copernicus: Summer 2022 Europe's hottest on record. *climate.copernicus.eu*
- Copernicus Climate Change Service, 2022. Surface air temperature for August 2022. *climate.copernicus.eu*
- davisinstrument.com
- European Environmental Agency, 2020. Climate-related hazard indices for Europe. *European topic centre on climate change impacts, vulnerability and adaptation (ETC/CCA) Technical Paper 2020/1*
- Intergovernmental Panel on Climate Change, 2014. Assessment Report 5. *ipcc.ch*
- Intergovernmental Panel on Climate Change, 2021. Assessment Report 6. *ipcc.ch*
- Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca,
ambientalesinacloud.isprambiente.it/portal/apps/MapSeries/index.html?appid=4a756d5e45c34010b2f870cf0b00cdbc. Consultato il 5/3/2023
- Kleerekoper et al., 2012. How to make a city climate-proof, addressing the urban heat island effect. *sciencedirect.com*
- National Oceanic and Atmospheric Administration, National Weather Service, 1990. Technical attachment SR 90-23. *noaa.gov*
- Oke T.R., 1978. Surface heat fluxes and the urban boundary layer. *WMO n. 510*
- Pearlmutter et al., 2017. The urban forest. Cultivating green infrastructure for people and the environment. Springer Press
- Pinna M., 1978. L'atmosfera e il clima. Torino, *UTET*
- Perini et al., 2014. Effects of vegetation, urban density, building height, and atmospheric conditions on local temperatures and thermal comfort. *sciencedirect.com*
- Pristeri et al., 2020. Mapping and assessing soil sealing in Padua municipality through Biotope Area Factor Index. *researchgate.net*
- Rousi et al., 2022. Accelerated western European heatwave trends linked to more-persistent double jets over Eurasia. *nature.com*
- Russo et al., 2014. Magnitude of extreme heat waves in present climate and their projection in a warming world. *researchgate.net*
- Russo et al., 2015. Top ten European heatwaves since 1950 and their occurrence in the coming decades. *researchgate.net*
- United Nations, 2018. Revision of World Urbanization Prospects. *population.un.org*
- World Meteorological Organization, 2017. Guidelines on the calculation of climate normals. *WMO Library*

