



Ricerca di Sistema elettrico

Modellazione numerica e verifica sperimentale di un sistema di raffrescamento evaporativo per la mitigazione del clima urbano

G. Coccia, C. Di Perna, G. Di Nicola, M. D'Orazio, E. Di Giuseppe

MODELLAZIONE NUMERICA E VERIFICA SPERIMENTALE DI UN SISTEMA DI RAFFRESCAMENTO EVAPORATIVO PER LA MITIGAZIONE DEL CLIMA URBANO

G. Coccia, C. Di Perna, G. Di Nicola (Università Politecnica delle Marche, Dipartimento di Ingegneria Industriale e Scienze Matematiche), M. D’Orazio, E. Di Giuseppe (Università Politecnica delle Marche, Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Architettura)

Dicembre 2021

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero della Transizione Ecologica - ENEA

Piano Triennale di Realizzazione 2019-2021 - II annualità

Obiettivo: Tecnologie

Progetto: Tecnologie per la penetrazione efficiente del vettore elettrico negli usi finali

Work package: Local Energy District

Linea di attività: LA39

Responsabile del Progetto: Claudia Meloni, ENEA

Responsabile del Work package: Claudia Meloni, ENEA

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all’interno dell’Accordo di collaborazione *“Sviluppo di metodi per la pianificazione di hub energetici multi-vettore in assetto Local Energy Community e soluzioni energeticamente sostenibili per la mitigazione termica urbana”*

Responsabile scientifico ENEA: Ing. Michele Zinzi / Dott.ssa Marialaura Di Somma

Responsabile scientifico Università: Prof. Costanzo Di Perna / Prof. Gabriele Comodi

Si ringraziano: Ing. Benedetta Gregorini (contributo alla analisi CFD), Ing. Claudia Cancellieri (contributo alla analisi micro-climatica), Ing. Serena Summa e Ing. Lucrezia Lazzarini (contributo alla analisi dati sperimentali), Ing. Giulia Ulpiani (contributo alla analisi micro-climatica).

Indice

Sommario.....	4
1 Introduzione.....	5
2 Descrizione delle attività svolte e risultati	6
2.1 STUDIO FLUIDODINAMICO DI PICCOLA SCALA.....	6
2.1.1 <i>Metodologia</i>	7
2.1.2 <i>Risultati</i>	10
2.2 STUDIO FLUIDODINAMICO A SCALA MICRO-URBANA.....	22
2.2.1 <i>Metodologia</i>	22
2.2.2 <i>Risultati</i>	28
2.3 STUDIO SPERIMENTALE.....	39
2.3.1 <i>Metodologia</i>	39
2.3.2 <i>Risultati</i>	48
3 Conclusioni.....	58
4 Riferimenti bibliografici.....	59
Curriculum scientifici del gruppo di lavoro.....	61

Sommario

Il presente report illustra le attività condotte e i risultati ottenuti dal gruppo di ricerca afferente all'UNIVPM nell'ambito dell'accordo di collaborazione con ENEA (Progetto 1.7 "Tecnologie per la penetrazione efficiente del vettore elettrico negli usi finali" del Piano Annuale di Realizzazione 2019-2021) per l'attività di ricerca dal titolo "Sviluppo di metodi per la pianificazione di hub energetici multi-vettore in assetto Local Energy Community e soluzioni energeticamente sostenibili per la mitigazione termica urbana". In particolare, si riportano la metodologia seguita e i principali risultati ottenuti relativamente alla valutazione di tecnologie per la mitigazione del surriscaldamento urbano locale attraverso sistemi di tipo *water mist spray* basati sul raffrescamento evaporativo.

I dispositivi *water mist spray* possono giungere a risultati importanti in termini di raffrescamento, con riduzioni di temperatura anche dell'ordine di 6 °C. Essi sono in grado di migliorare in modo significativo il comfort e la vivibilità degli individui in ambienti urbani all'aperto durante tipiche giornate estive. Tali dispositivi possono essere impiegati efficacemente in aree di permanenza quali piazze, parchi pubblici, strade, ma anche pergolati di bar e ristoranti. Diversi studi già condotti hanno evidenziato come il layout geometrico e di funzionamento del dispositivo di raffrescamento influenzino l'efficacia del sistema. Per questo motivo, l'attività di ricerca si è focalizzata sui due aspetti riportati di seguito.

a) Modellazione fluidodinamica e microclimatica. Il primo caso riguarda simulazioni in regime transitorio (CFD, *Computational Fluid Dynamics*) del volume di aria perturbato dall'azione nebulizzante, al fine di cogliere la complessità dei fenomeni fisici coinvolti; il secondo caso riguarda simulazioni analitiche di tipo climatico a scala micro-urbana, al fine di comprendere l'impatto di varianti nella configurazione del sistema nebulizzante sui parametri climatici a livello locale, verificando altresì l'estensione e l'intensità dell'azione raffrescante. I modelli sono stati calibrati su dati di monitoraggio.

b) Progettazione, realizzazione e valutazione sperimentale, in ambiente reale, di un nuovo prototipo per il raffrescamento urbano, basato su sistemi di micro-nebulizzazione. Nello specifico, il prototipo è stato valutato in diverse configurazioni e diversi contesti climatici. L'effetto locale di raffrescamento è stato quantificato nel tempo e nello spazio tramite mappature di tipo termoigrometrico. Al fine di valutare le prestazioni dell'impianto di raffrescamento *water mist spray in diverse ipotesi progettuali*, si è implementato quanto segue:

- 1) modifica del layout dei filari degli ugelli nebulizzanti;
- 2) accoppiamento del sistema di raffrescamento con una schermatura solare;
- 3) sviluppo di un prototipo in una rete integrante apporti energetici.

Data la necessità di raccogliere un numero sufficiente di dati per ogni variante progettuale, il monitoraggio si è svolto ad Ancona in ambiente esterno protetto; ciò ha permesso di evitare azioni esterne indesiderate e di garantire una maggiore controllabilità dei parametri. Contestualmente alle attività di monitoraggio dei parametri ambientali, sono stati raccolti feedback personali nella forma di questionari di comfort termico, così da verificare la corrispondenza tra soddisfazione personale e dato misurato.

1 Introduzione

Il recente rapporto pubblicato dall'IPCC evidenzia in modo inequivocabile che il riscaldamento globale è conseguenza diretta delle attività antropiche, e che è necessario intraprendere azioni drastiche al fine di contenere l'aumento della temperatura media globale [1]. In questo contesto, gli studi riguardanti il fenomeno dell'isola di calore urbana (UHI, *Urban Heat Island*) vanno considerati con particolare attenzione, in quanto l'aumento della temperatura media nei grandi centri urbani potrebbe portare a problematiche di rilevante importanza come peggioramento delle condizioni di comfort termoigrometrico e salute dei cittadini, eventi meteorologici estremi e disparità sociali [2].

In letteratura, molti lavori scritti allo scopo di proporre soluzioni alla mitigazione dell'isola di calore urbana sono basati sull'uso di superfici ad elevata riflettività nello spettro solare, e consistono ad esempio in un maggior utilizzo della vegetazione e nell'uso di *cool o green roof* [3]–[5]. Al contrario, sono disponibili pochi lavori relativamente alle tecnologie di raffrescamento evaporativo a base di acqua. Tali tecnologie non includono soltanto soluzioni basate su ampi bacini d'acqua, che in ogni caso risulterebbero prerogativa di pochi, specifici insediamenti urbani. Diversi studi hanno invece sottolineato come tra le tecniche più efficaci di raffrescamento evaporativo vi siano i sistemi basati sulla nebulizzazione dell'acqua [6], [7]. Ad oggi, queste soluzioni sono per lo più usate presso attività private in contesti come pergolati, balconi e giardini di ristoranti, bar, musei, ecc., al fine di raggiungere condizioni soddisfacenti di comfort igrometrico esterno [8]–[10]. Tuttavia, non essendo ancora del tutto ben studiati i parametri progettuali che maggiormente influenzano l'efficacia di raffrescamento di tali sistemi, le prestazioni di questi ultimi possono risultare anche molto lontane dalle condizioni ideali, identificate come noto nel raggiungimento della temperatura di bulbo umido. La letteratura scientifica disponibile ad oggi in merito ai sistemi evaporativi a base di nebulizzazione dell'acqua consiste per lo più in valutazioni di tipo numerico, mentre solo pochi lavori riportano indagini sperimentali su scala reale, in quanto costosi e difficili da realizzare [2].

A differenza dei sistemi evaporativi di tipo superficiale o a spruzzo (*sprinkler systems*), i sistemi basati sulla nebulizzazione fine dell'acqua (chiamati anche, in gergo tecnico, *water mist spray*) permettono un'evaporazione praticamente totale dell'acqua immediatamente dopo la sua iniezione nell'aria [11]. Nei sistemi evaporativi basati sull'iniezione spray di acqua, le goccioline di acqua sono immerse nell'aria grazie a specifici ugelli nebulizzatori. L'uso degli ugelli consente non solo di ridurre drasticamente la quantità di acqua usata, ma anche di evitare il bagnamento delle superfici e delle persone. La nebulizzazione dell'acqua migliora il mescolamento delle gocce nell'aria stessa ed incrementa la superficie di contatto tra aria e gocce d'acqua; ciò si traduce in un più elevato tasso di evaporazione, che migliora l'effetto del raffrescamento percepito [12], [13]. Inoltre, le particelle possono attenuare l'effetto della radiazione solare nell'infrarosso e possono persino proteggere dalle radiazioni di tipo ultravioletto [14]. I flussi bifase che si hanno in sistemi basati sul raffrescamento evaporativo sono influenzati da numerosi parametri, tra cui la velocità del flusso, la temperatura e l'umidità dell'aria, la distribuzione delle particelle liquide, la loro velocità e temperatura, nonché le interazioni particelle-fase continua e particella-particella [15].

La tecnica del raffrescamento evaporativo presenta diversi vantaggi rispetto ad altre tecnologie di controllo microclimatico. Come sottolineato in precedenza, essa è a basso impatto ambientale e può essere realizzata a basso costo, facendo uso di soluzioni tecnologiche relativamente semplici. I sistemi evaporativi si integrano facilmente nelle infrastrutture già esistenti nelle città e questo consente ai progettisti di lavorare con maggiore flessibilità. A differenza di altre soluzioni di mitigazione dell'isola di calore urbana (come il già citato utilizzo di superfici ad elevata albedo), i sistemi evaporativi possono essere gestiti in modo dinamico e messi in funzione solo quando vi è effettiva necessità di raffrescamento [16].

In un precedente report [17] realizzato da alcuni autori del presente lavoro, si erano riportati i risultati di natura numerica e sperimentale relativi ad un sistema di raffrescamento evaporativo basato su ugelli nebulizzatori. In quel caso, l'attenzione era rivolta ad evidenziare le differenze prestazionali tra un sistema di piccola scala installato nella città di Ancona ed un sistema di media scala installato a Roma. Tali differenze erano state valutate sia attraverso una campagna di prove sperimentali, sia attraverso simulazioni di tipo numerico. Nella fattispecie, i test sperimentali avevano evidenziato una variazione prestazionale relativa al

tipo di logica di controllo usata per la routine di nebulizzazione (ON-OFF vs. una logica di tipo fuzzy, con quest'ultima in grado di garantire prestazioni superiori sia in termini di consumo energetico che di comfort termoigrometrico).

Prendendo le mosse dal precedente studio [17], il presente report ha lo scopo di approfondire quali siano i parametri progettuali e di funzionamento che maggiormente influenzano le prestazioni di un sistema di raffrescamento evaporativo basato su ugelli nebulizzatori. L'analisi include anche la raccolta ed elaborazione di sondaggi condotti per valutare le sensazioni di comfort termoigrometrico percepito dagli utenti, nonché la valutazione dell'integrazione del sistema di raffrescamento evaporativo con un impianto energetico basato su fonti rinnovabili. A tale scopo, lo studio è stato articolato in tre parti che vanno ad analizzare il comportamento di tali sistemi sia da un punto vista numerico che sperimentale.

a) Modellazione fluidodinamica di piccola scala. In questa fase si è valutato, in regime transitorio, la termofluidodinamica nell'immediato intorno del sistema nebulizzante, attraverso l'ambiente di simulazione ANSYS Fluent. L'analisi è stata circoscritta all'area sottesa dalla matrice di nebulizzatori, in uno spettro temporale sufficiente ad osservare il pre-, durante e post-azionamento del sistema, ed in una finestra di monitoraggio caratterizzata da bassissime velocità del vento (<1 m/s registrate in ambiente aperto, non mitigato) in modo da facilitare il trascinamento delle particelle all'interno del mezzo continuo (aria umida). Fluent consente un approccio misto Euleriano-Lagrangiano, particolarmente idoneo a simulare le dispersioni e gli agglomerati di particelle (gocce in questo caso) in regime turbolento.

b) Modellazione fluidodinamica a scala micro-urbana. Nell'ottica finale di mitigazione del surriscaldamento urbano, il comportamento termodinamico del nebulizzatore va ad interfacciarsi con il complesso fenomenologico del "sistema città". In questa fase, si è dunque sviluppato un modello a scala micro-urbana attraverso il software fluidodinamico ENVI-met, già ampiamente validato per applicazioni simili [18] e capace di contemplare le interazioni tra flusso di aria, superfici e vegetazione cittadina. ENVI-met genera un modello 3D microclimatico che tiene conto di equazioni RANS (*Reynolds-averaged non-hydrostatic Navier-Stokes*), di modelli di turbolenza per la risoluzione dei moti d'aria, della computazione dei flussi radiativi (diretti, diffusi e riflessi) scambiati dai materiali in gioco nonché della dispersione di miscele o soluzioni multifase in ambiente. Il tutto in un'infrastruttura computazionale molto orientata ai fenomeni dominanti nel *built environment*.

c) Progettazione, realizzazione e valutazione sperimentale del prototipo di dispositivo nebulizzante e del sistema di controllo. Durante questa fase si è progettato e realizzato un dispositivo prototipale per la valutazione sperimentale, installato in un ambiente controllato presso l'Università Politecnica delle Marche di Ancona. Data la complessità fenomenologica, si è deciso di utilizzare un approccio non convenzionale, ossia di non realizzare un prototipo definito sulla sola base dei risultati di simulazione, bensì di costruire una struttura altamente modulare per ottenere dati sperimentali validi per svariate configurazioni, costruire in seguito un modello calibrato e verificare in tandem la configurazione a massimo potenziale di raffrescamento (altezza, passo tra gli ugelli, ecc.). In questa fase è stato anche definito l'algoritmo di regolazione dell'erogazione della pompa, al fine di impartire una serie di regole operazionali alla temporizzazione del getto nebulizzato.

2 Descrizione delle attività svolte e risultati

L'attività di ricerca svolta è stata di tipo sia sperimentale che numerico. Pertanto, il paragrafo in esame analizza in modo separato le diverse tipologie di attività, riportandone sia le metodologie che i principali risultati.

2.1 Studio fluidodinamico di piccola scala

Lo studio fluidodinamico di piccola scala ha permesso di valutare come i principali parametri che caratterizzano il funzionamento di un sistema di raffreddamento evaporativo di tipo *water mist spray* influenzano le prestazioni dello stesso. Per condurre le simulazioni, è stato usato il software ANSYS Fluent.

2.1.1 Metodologia

Lo studio ha considerato l'influenza sul sistema di raffreddamento dei seguenti parametri progettuali o condizioni al contorno:

- numero di iniettori al metro quadrato;
- interasse medio tra gli iniettori;
- condizioni al contorno, in particolare la velocità dell'aria in ingresso nel volume considerato, dall'alto o perpendicolarmente al getto delle gocce (da "est");
- posizione in altezza degli iniettori, a 3,70 m o a 3,00 m;
- tipologia di iniettori, con 3 diversi tipi di ugelli (0,15 mm, 0,20 mm e 0,50 mm) che influenzano la portata e la dimensione delle particelle.

Al fine di valutare gli effetti sulle prestazioni del sistema, si sono analizzate le variazioni delle principali grandezze termoigrometriche (temperatura, umidità specifica e umidità relativa), dell'indice di comfort UTCI, del parametro *cooling efficiency* (CE) e delle quote sensibile e latente dell'entalpia dell'aria umida (*sensible/latent cooling*).

Lo studio si è articolato in 3 fasi:

- Fase 1: simulazioni con variazione delle condizioni di input (numero iniettori/ m², interasse, velocità in ingresso, altezza, tipologia ugelli).
- Fase 2: valutazione della variazione delle grandezze termoigrometriche.
- Fase 3: valutazione degli indici UTCI, *cooling efficiency* e *sensible/latent cooling*.

La Tabella 1 riassume tutte le condizioni simulate. In particolare, sono riportate le variabili che sono state modificate, ovvero:

- n° iniettori, diametro dell'ugello Φ [mm] e di conseguenza la portata [kg/min] e il numero di iniettori per metro quadrato;
- l'interasse medio i_m [m] (ovvero mediato tra l'interasse X e Y tra gli iniettori);
- la posizione in altezza h_Z [m] degli iniettori;
- la velocità dell'aria W_s [m/s] e la direzione dell'aria W_d .

Sono state riassunte anche le condizioni termoigrometriche iniziali impostate e gli indici da esse derivanti:

- temperatura iniziale T_0 [°C];
- umidità specifica iniziale x_0 [g/kgas];
- umidità relativa iniziale U_{R0} [%];
- indice UTCI dato dalle condizioni iniziali UTCI0 [°C];
- entalpia iniziale h_0 [kJ/kgas], riportando anche le divisioni tra sensibile e latente.

I valori impostati in Fluent per portata e diametri sono stati ricavati dalla scheda tecnica degli ugelli utilizzati nell'apparato sperimentale.

Tabella 1. Riepilogo delle simulazioni effettuate

Prova	Nome Simulazione	n°iniettori [-]	Φ ugello [mm]	portata [kg/min]	n°iniettori /m²	i_m [m]	h_Z [m]	Ws [m/s]	Wd	T0 [°C]	x0 [g/kgas]	URO [%]	UTCIO [°C]	h0 [kJ/kgas]
Inter	int 1.00	4	0.15	0.24	0.11	1.000	3.70	0.300	Alto	30.00	13.00	49	30.30	29+32=61
	int 1.50	4	0.15	0.24	0.11	1.500								
	int 2.00	4	0.15	0.24	0.11	2.000								
	int 2.50	4	0.15	0.24	0.11	2.500								
Inj/m²	inj 4 - 2x2	4	0.15	0.24	0.11	3.125	3.70	0.300	Alto	30.00	13.00	49	30.30	29+32=61
	inj 9 - 3x3	9	0.15	0.54	0.24	2.000								
	inj 12 - 4x3	12	0.15	0.72	0.32	0.850								
	inj 15 - 5x3	15	0.15	0.90	0.40	0.850								
	inj 20 - base	20	0.15	1.20	0.53	1.375								
	inj 40 - 8x5	40	0.15	2.40	1.07	1.000								
Vel	inj 20 - alto	20	0.15	1.20	0.53	1.375	3.70	0.300	Alto	30.00	13.00	49	30.30	29+32=61
	inj 20 - est	20	0.15	1.20	0.53	1.375	3.70	0.100	Est	30.00	13.00	49	30.30	29+32=61
h_Z	inj 20 - alto_3m	20	0.15	1.20	0.53	1.375	3.00	0.300	Alto	30.00	13.00	49	30.30	29+32=61
	inj 20 - est_3m	20	0.15	1.20	0.53	1.375	3.00	0.100	Est	30.00	13.00	49	30.30	29+32=61
Φ_inj	uge 20 – alto	20	0.20	1.80	0.53	1.375	3.70	0.300	Alto	30.00	13.00	49	30.30	29+32=61
	uge 20 – est_3m	20	0.20	1.80	0.53	1.375	3.70	0.100	Est	30.00	13.00	49	30.30	29+32=61
	uge 50 – alto	20	0.50	4.20	0.53	1.375	3.00	0.300	Alto	30.00	13.00	49	30.30	29+32=61
	uge 50 – est_3m	20	0.50	4.20	0.53	1.375	3.00	0.100	Est	30.00	13.00	49	30.30	29+32=61

Come primo step dell’analisi è stata valutata la variazione percentuale che si ottiene in termini di raffreddamento del volume. Le grandezze termoigrometriche valutate sono: temperatura T [°C], umidità specifica x [g/kgas] e umidità relativa UR [%]. Le variazioni percentuali sono state determinate come:

$$\left\{ \begin{aligned} \Delta T &= \frac{T_m - T_0}{T_0} \\ \Delta x &= \frac{x_m - x_0}{x_0} \\ \Delta UR &= \frac{UR_m - UR_0}{UR_0} \end{aligned} \right.$$

dove T_m , x_m e UR_m sono la temperatura, l’umidità specifica e l’umidità relativa che si ottengono alla fine della simulazione, mentre T_0 , x_0 e UR_0 sono la temperatura, l’umidità specifica e l’umidità relativa della superficie all’inizio della simulazione. I valori di T_m , x_m e UR_m sono calcolati come valore medio dell’integrale di superficie di riferimento a 1,50 m da terra, dopo 10 secondi dall’attivazione del getto.

Parallelamente alla valutazione della variazione percentuale, è stata considerata la distribuzione delle grandezze termoigrometriche in termini di oscillazione tra valore minimo e massimo registrati. I valori registrati (ovvero T_{min_60} , T_{max_60} , x_{min_60} , x_{max_60} , UR_{min_60} , UR_{max_60}) sono stati mediati ogni 60 cm (larghezza di riferimento per le dimensioni di una persona). È stato preso come riferimento per la lettura di questi valori un asse passante per la fila centrale degli iniettori e diretto lungo l’asse X (maggiormente descrittivo dell’influenza delle condizioni in input). La Tabella 2 riassume tutte le variabili considerate per il calcolo delle grandezze termoigrometriche e successivamente degli indici.

Tabella 2. Variabili considerate per la valutazione delle grandezze termoigrometriche e degli indici

Misurazione	Tempo misurazione [s]	Temperatura [°C]	Temperatura a bulbo umido [°C]	Umidità Specifica [g/kgas]	Umidità Relativa [%]	Velocità del vento [m/s]
Sup 1.50m –	0	T_0	T_0 b.umido	x_0	UR_0	ws_0
Area Weighted Average	10	T_m	-	x_m	UR_m	ws_m
Asse X –	10	T_min	-	x_min	UR_min	ws_min
media 60cm	10	T_max	-	x_max	UR_max	ws_max

Gli indici disponibili per valutare il comfort termoigrometrico delle persone sono numerosi [19], [20], ma tra questi si è scelto di utilizzare l'indice UTCI (*Universal Thermal Climate Index*) perché permette di considerare contemporaneamente l'effetto delle tre variabili principali (temperatura, umidità e velocità dell'aria) con un basso costo di computazione. L'indice UTCI calcola in prima istanza i valori di temperatura percepiti dall'uomo [21] in funzione della temperatura esterna T_a , della temperatura media radiante T_r , della velocità dell'aria v_a e della pressione di vapore p_v , tenendo anche conto dell'abbigliamento (in funzione delle condizioni di esposizione) e di un'attività motoria di camminata (4 km/h). L'indice UTCI [21] è stato valutato in base alle seguenti equazioni:

$$\begin{cases} UTCI_{iniziale} = Ta_0 + Offset(Ta, Tr, va, URa)_0 \\ UTCI_{medio} = Ta_m + Offset(Ta, Tr, va, URa)_m \end{cases}$$

dove la temperatura media radiante T_r è stata considerata uguale a 30 °C e la velocità dell'aria a 10 metri è stata considerata pari a 0,5 m/s. Dagli UTCI_iniziale e UTCI_medio si è quindi calcolata la variazione percentuale $\Delta UTCI$ [%]. Per analizzare le oscillazioni sono stati determinati sia UTCI_min che UTCI_max. Il primo corrisponde a valori minimi di temperatura (e massimi di UR, dato il tipo di sistema di raffrescamento); il secondo, viceversa, corrisponde a valori massimi di temperatura e minimi di UR. Ai valori di UTCI che oscillano tra -40 °C e +46 °C vengono associate 10 diverse categorie di stress termico, come riportato in Tabella 3 [21].

Tabella 3. Categorie di stress termico associate all'indice UTCI

UTCI range [°C]	Stress termico
UTCI > 46	<i>Extreme heat stress</i>
38 < UTCI ≤ 46	<i>Very strong heat stress</i>
32 < UTCI ≤ 38	<i>Strong heat stress</i>
26 < UTCI ≤ 32	<i>Moderate heat stress</i>
9 < UTCI ≤ 26	<i>No thermal stress</i>
0 < UTCI ≤ 9	<i>Slight cold stress</i>
-13 < UTCI ≤ 0	<i>Moderate cold stress</i>
-27 < UTCI ≤ -13	<i>Strong cold stress</i>
-40 ≤ UTCI ≤ -27	<i>Very strong cold stress</i>
UTCI < -40	<i>Extreme cold stress</i>

In aggiunta all'indice di comfort UTCI, è stata valutata anche l'efficienza del sistema in termini di *cooling efficiency* (CE), così come effettuato in altri studi [2], [15], [22], [23]. La CE è un indice proposto dall'ASHRAE [24], [25] e valuta l'abbassamento di temperatura riferito alla temperatura di bulbo umido, che rappresenta

il valore minimo idealmente raggiungibile in un sistema evaporativo; nel presente lavoro, la CE è stata calcolata relativamente alla temperatura media come descritto dall'equazione seguente:

$$CE[\%] = \frac{T_0 - T_m}{T_0 - T_{0,b.umido}}$$

dove si è assunta una $T_{0,b.umido}$ corrispondente alle condizioni iniziali di $T = 30 \text{ °C}$ e $x = 13 \text{ g/kgas}$, ovvero pari a $21,71 \text{ °C}$. Per i sistemi di raffreddamento evaporativo, solitamente la *cooling efficiency* risulta superiore al 50% [26].

Relativamente alla variazione di entalpia dell'aria umida, per verificare se il sistema fosse o meno classificabile come adiabatico essa è stata calcolata tra inizio e fine della simulazione come:

$$\Delta h[\%] = \frac{h_m - h_0}{h_0}$$

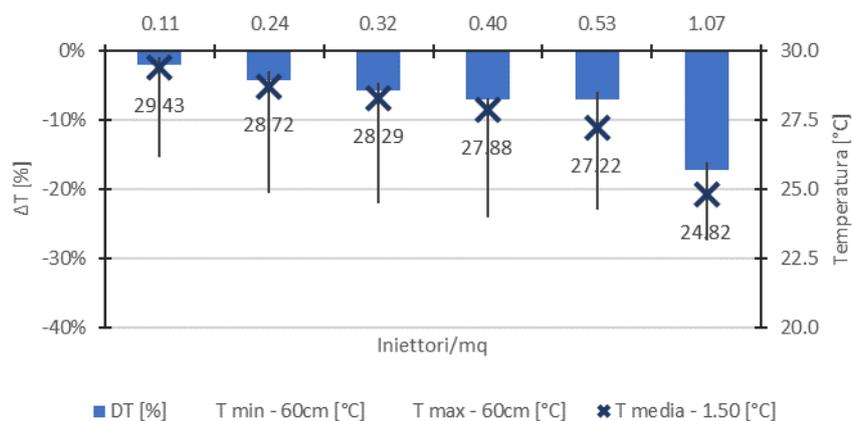
dove h_m e h_0 [kJ/kgas] sono state calcolate attraverso la nota definizione di entalpia per l'aria umida:

$$h \left[\frac{kJ}{kgas} \right] = c_{p,as}T + x(r_0 + c_{pv}T)$$

I valori di $c_{p,as}$, r_0 e $c_{p,v}$ sono stati calcolati in accordo con il valore di temperatura T . Dall'espressione dell'entalpia è stato ovviamente possibile ricavare la componente sensibile e latente della trasformazione.

2.1.2 Risultati

La Figura 1 riporta la variazione percentuale, il valore medio e l'oscillazione tra minimo e massimo delle grandezze termoisometriche (T , x e UR) al variare del numero degli iniettori per metro quadrato. Il primo risultato evidente è che queste grandezze aumentano linearmente all'aumentare del numero di iniettori per metro quadrato. Ipotizzando una riduzione di almeno $2,5 \text{ °C}$ della temperatura media T_m , occorrono almeno 0,53 iniettori per metro quadrato. Per la superficie definita nelle simulazioni ($37,5 \text{ m}^2$), ciò corrisponde a 20 iniettori.



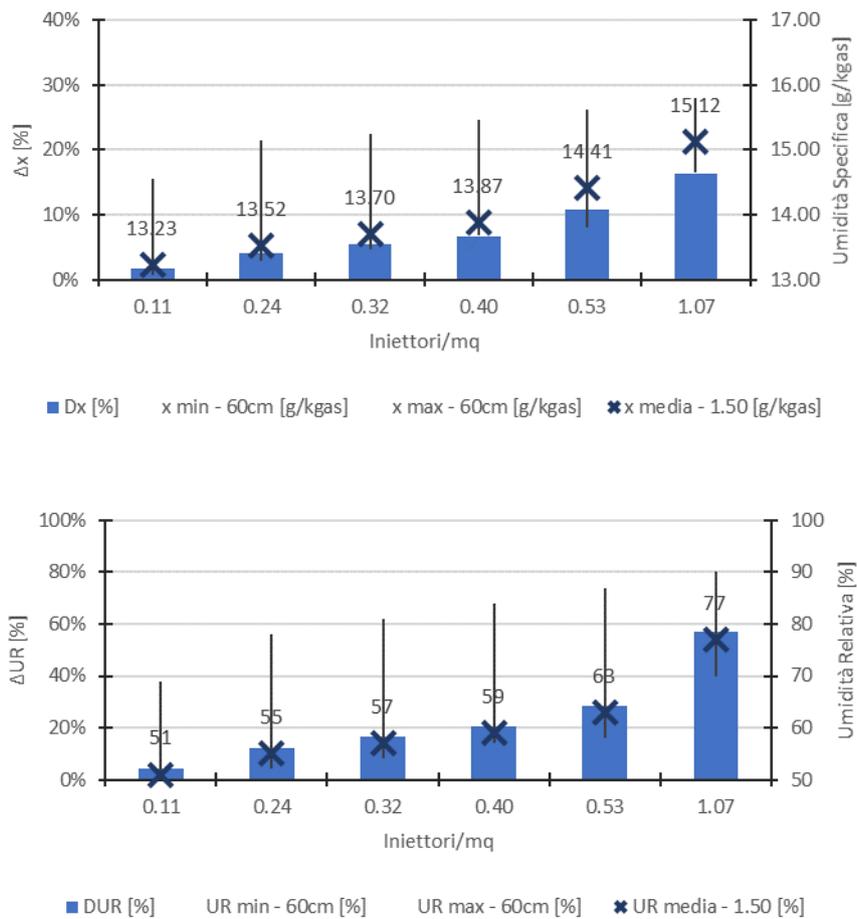
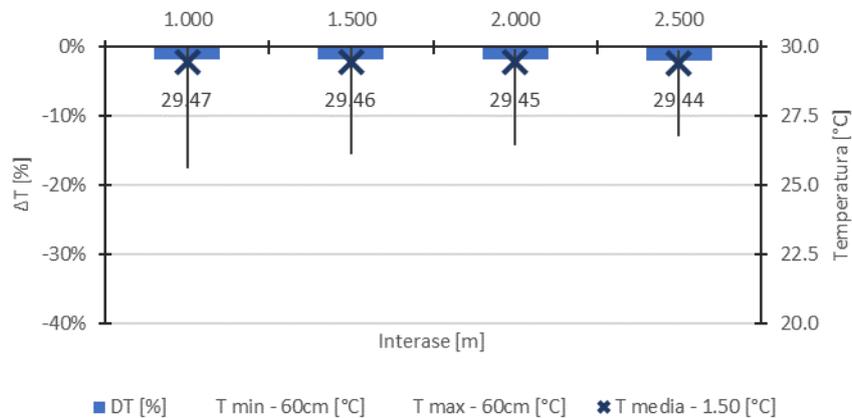


Figura 1. Variazione delle grandezze termoigrometriche al variare del numero di iniettori per metro quadrato

La variazione dell'interasse, invece, non influenza la variazione delle grandezze termoigrometriche (Figura 26), se non in piccola parte. In particolare, si nota solo una variazione dei valori minimi della temperatura e massimi per x e UR , al ridursi dell'interasse.



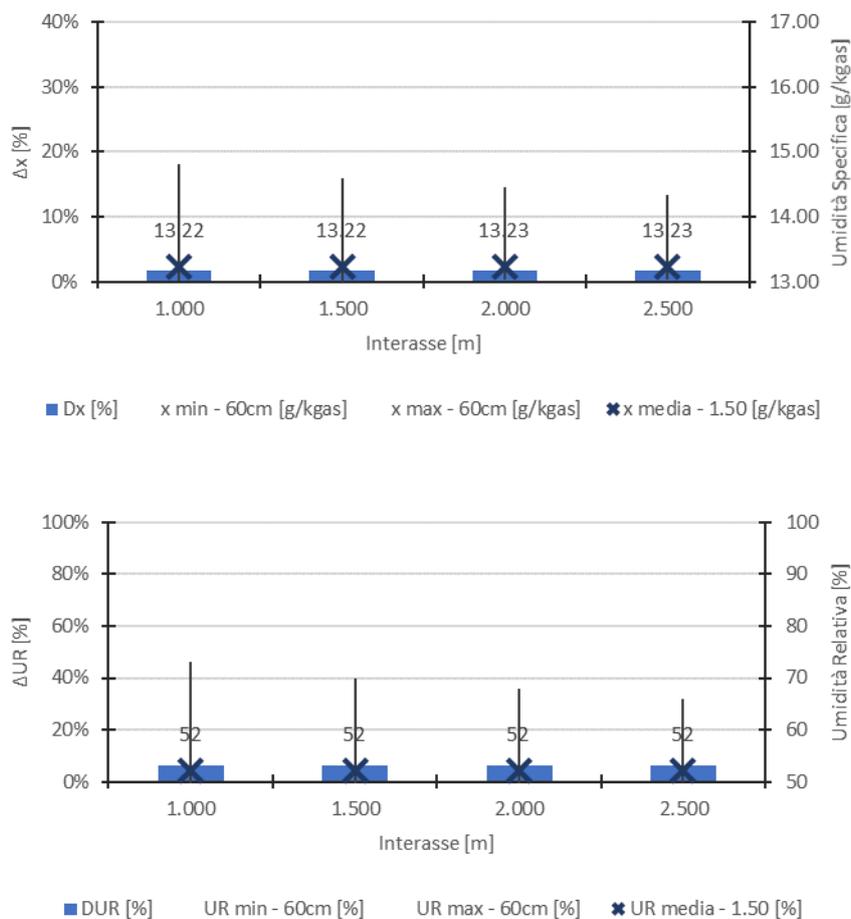


Figura 2. Variazione delle grandezze termoigrometriche al variare dell'interasse

L'influenza della velocità dell'aria è stata valutata solo per un numero di iniettori per metro quadrato pari a 0,53, in quanto dalle precedenti analisi si è notato che tale valore risulta il minimo utile per avere un effetto apprezzabile di raffreddamento evaporativo. Dalla Figura 3 si può vedere come la direzione della velocità (dall'alto, parallela al getto degli iniettori) permetta di raggiungere una variazione percentuale del 10% circa, contro il 7% che si ha con una velocità perpendicolare al getto (da est). Si può però anche notare come ci sia un'oscillazione elevata di circa 5 °C tra i valori minimi e massimi registrati lungo la superficie, mentre l'oscillazione si riduce a 2,5 °C circa per la velocità da est. Le stesse considerazioni valgono anche per l'umidità specifica e relativa. Sempre dalla Figura 3 si nota come l'altezza abbia un effetto opposto rispetto alla direzione della velocità: se la velocità in ingresso è dall'alto, abbassare la posizione degli iniettori riduce l'effetto di raffreddamento del sistema (perché diminuisce la sezione del cono del getto); con una velocità in ingresso perpendicolare al getto, invece, si ha che l'effetto di raffreddamento è maggiore abbassando l'altezza degli iniettori. Questo avviene perché si riduce la perdita di particelle trasportate al di fuori della superficie di riferimento. Va infine notato come i due sistemi (alto – 3,70 m ed est – 3,00 m) raggiungano lo stesso risultato in termini di variazione percentuale per temperatura e umidità relativa con i rispettivi valori medi. L'oscillazione resta invece sempre molto diversa tra i due sistemi.

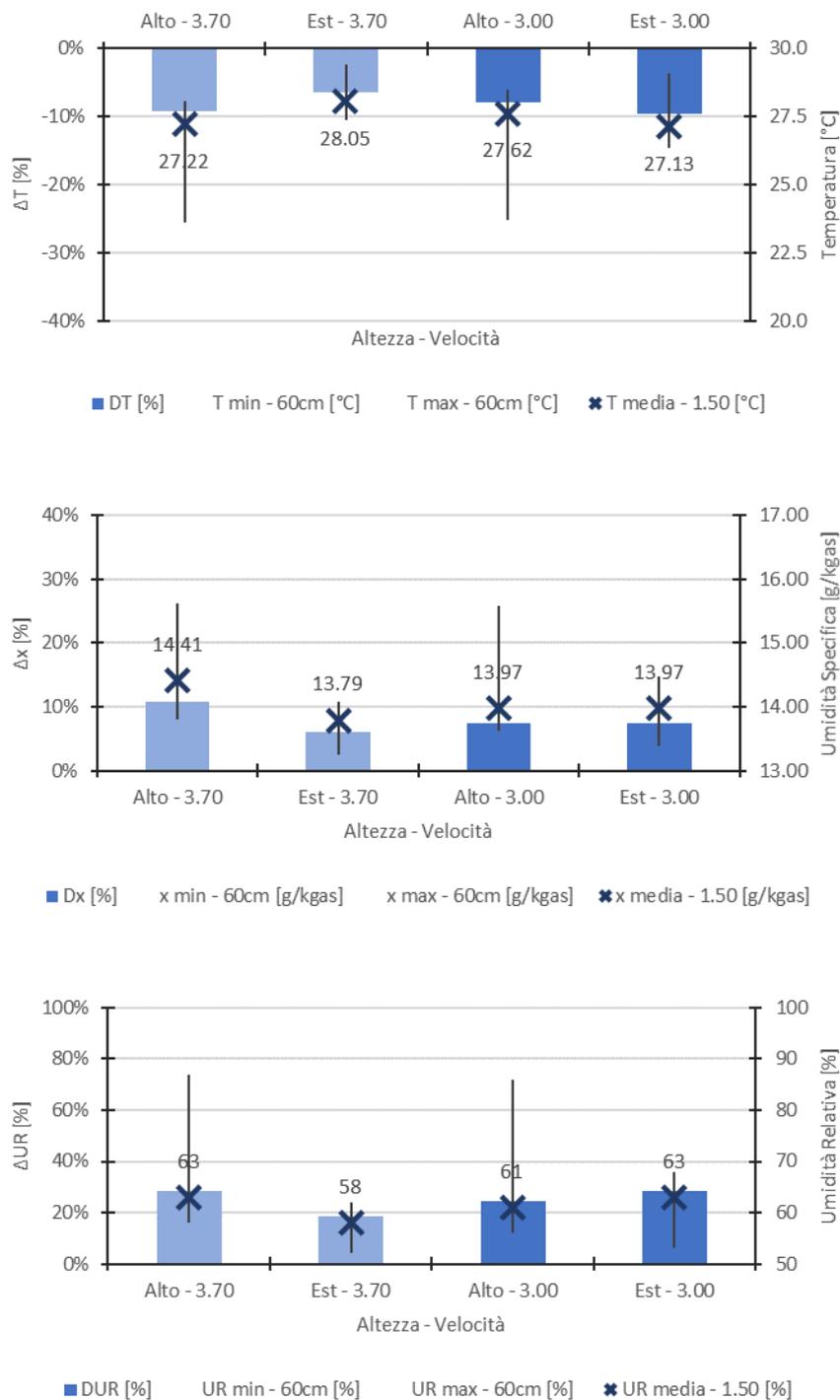


Figura 3. Variazione delle grandezze termoigrometriche al variare della velocità dell'aria e dell'altezza degli ugelli

Anche l'influenza del diametro degli ugelli è stata valutata considerando 0,53 iniettori/m² (pari a 20 nel volume di riferimento), considerando le due condizioni di altezza e velocità più favorevoli, ovvero con velocità dall'alto a 3,70 m e con velocità da est a 3,00 m (Figura 4). Le prime due barre (celesti chiaro) fanno riferimento ai due sistemi (alto – 3,70 m ed est – 3,00 m) della Figura 3, così da avere un confronto diretto. È possibile notare come l'ugello con Φ 0,20 mm riduca la temperatura media di oltre 1 °C rispetto all'ugello Φ 0,15 mm finora simulato, mentre l'ugello con Φ 0,50 mm abbassi la T_m fino a 22,5 °C. Inoltre, con l'ugello Φ 0,50 mm, la superficie di riferimento raggiunge pressoché le condizioni di saturazione dell'aria ($UR = 94-98\%$).

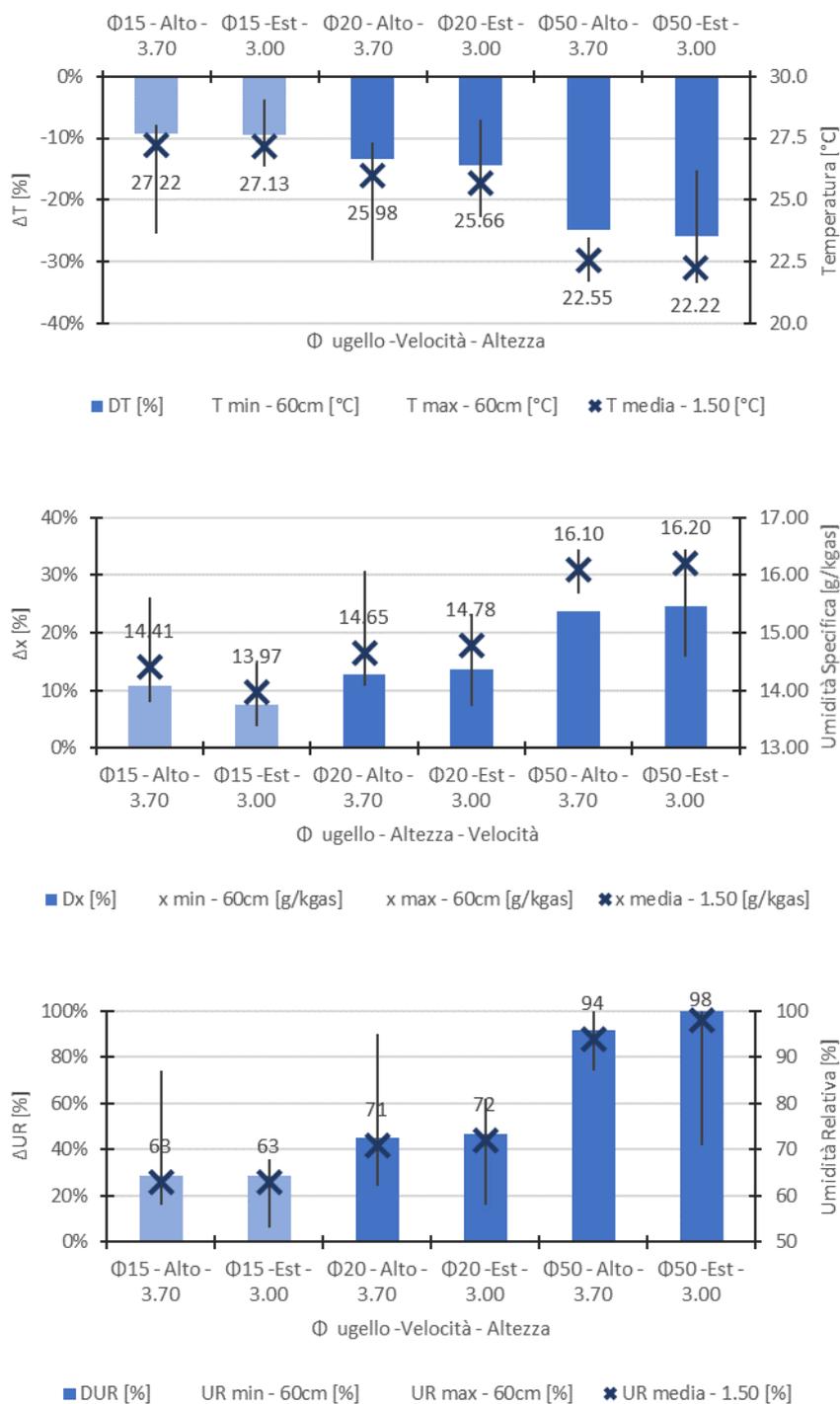


Figura 4. Variazione delle grandezze termoigrometriche al variare del diametro degli ugelli

La Figura 5 mostra come varia la temperatura di bulbo secco dell'aria lungo l'asse longitudinale del sistema di raffreddamento simulato in base a diverse configurazioni, che sono risultate le più prestanti nell'analisi:

- Sistema 1: 0,53 iniettori al metro quadrato – diametro ugelli Φ 0,15 mm – velocità dall'alto = 0,30 m/s – altezza ugelli h = 3,70.
- Sistema 2: 0,53 iniettori al metro quadrato – diametro ugelli Φ 0,15 mm – velocità da est = 0,10 m/s – altezza ugelli h = 3,00.

- Sistema 3: 0,53 iniettori al metro quadrato – diametro ugelli Φ 0,20mm – velocità dall’alto = 0,30 m/s – altezza ugelli $h = 3,70$.
- Sistema 4: 0,53 iniettori al metro quadrato – diametro ugelli Φ 0,20mm – velocità da est = 0,10 m/s – altezza ugelli $h = 3,00$.

Dalla Figura 5 si può notare come nei sistemi 1 e 3 si hanno variazioni di temperatura oscillanti tra 3,5 °C e 5 °C per ogni metro; nei sistemi 2 e 4, invece, la distribuzione dei valori di temperatura è pressoché costante fino a 1,00 m dall’ingresso dell’aria. L’utilizzo di un diametro più grande per gli ugelli crea uno scostamento tra le curve di circa 2,5 °C.

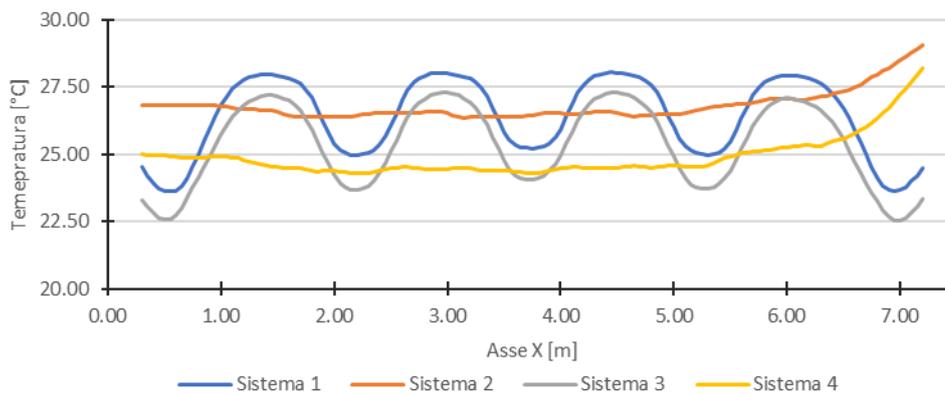


Figura 5. Andamento della temperatura lungo l’asse longitudinale del sistema di raffreddamento

La Figura 6 riporta la variazione ed il valore puntuale dell’indice di comfort UTCI per diverse configurazioni simulate. Si può notare che l’indice UTCI risulta sempre compreso nella categoria di stress termico di “caldo moderato” (*moderate heat stress*).

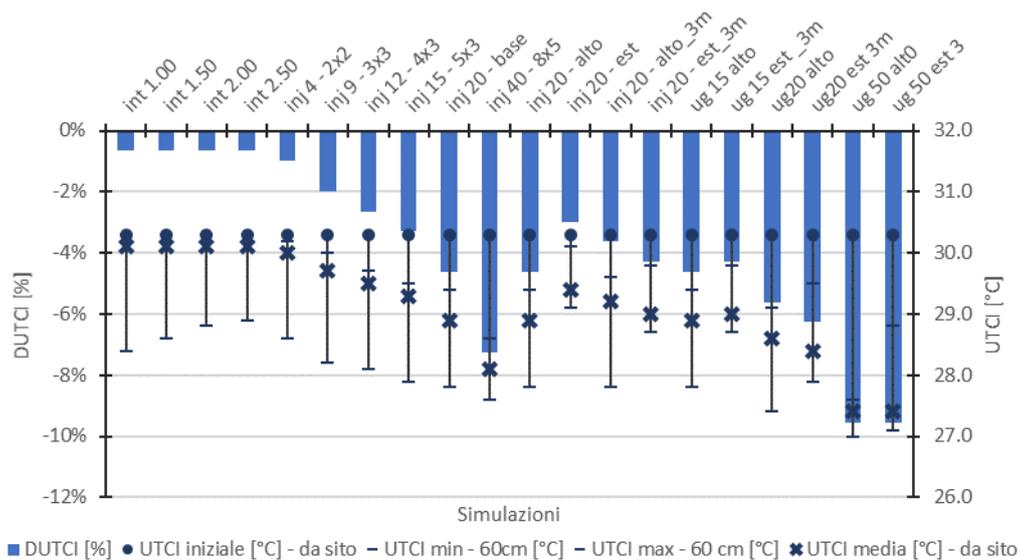
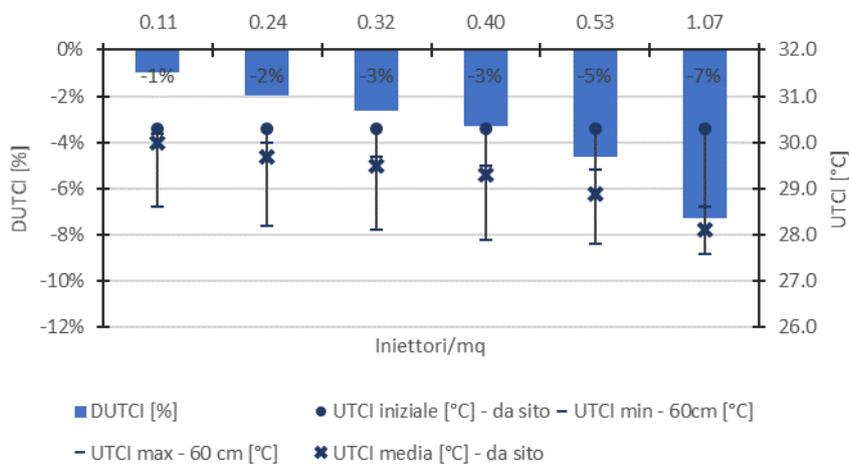


Figura 6. Variazione e valore puntuale dell’indice UTCI per differenti simulazioni

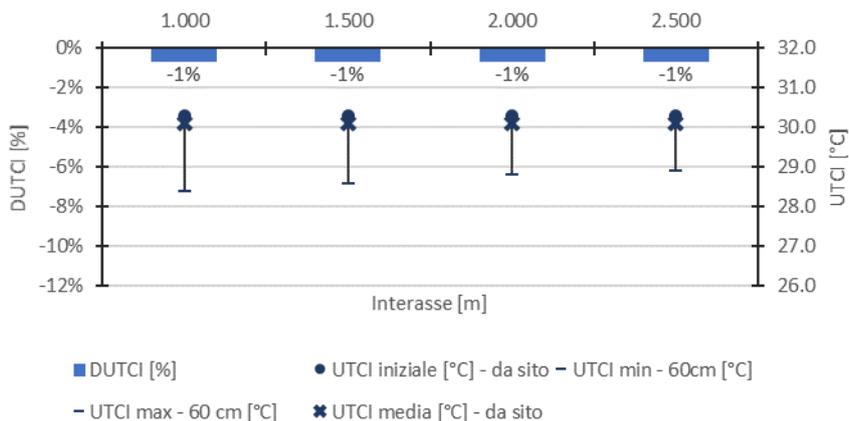
Considerando invece la variazione parametro per parametro, si ottiene che l’indice UTCI:

- varia meno che linearmente al variare del numero di iniettori al metro quadrato, per esempio se si considerano 0,53 iniettori per metro quadrato la variazione è pari al -5% (Figura 7a);
- non subisce variazioni significative al variare dell'interasse (Figura 7b);
- ha un comportamento opposto rispetto alle condizioni al contorno e all'altezza: per la velocità dell'aria dall'alto, l'indice UTCI si abbassa maggiormente con un'altezza di 3,70 m, mentre con velocità da est, l'indice UTCI si abbassa con un'altezza di 3,00 m (Figura 7c);
- anche al variare del diametro degli ugelli, varia meno che linearmente (Figura 7d).

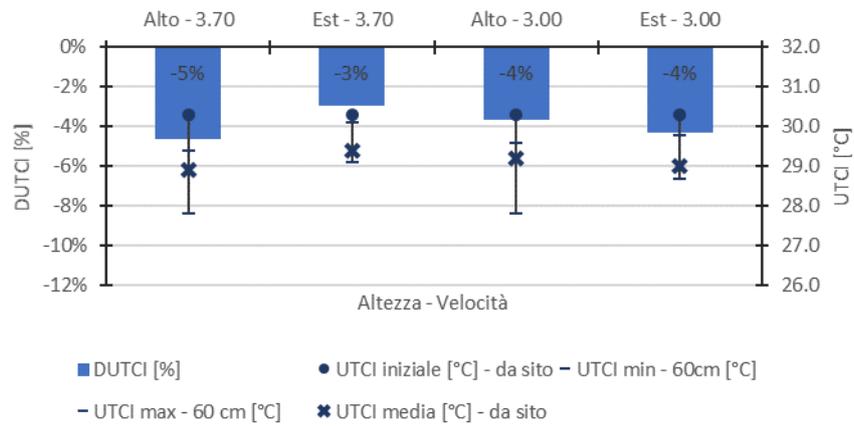
Ad ogni modo, la variazione dell'UTCI conferma quanto evidenziato precedentemente, ovvero che i sistemi denominati "sistema 1-4" sono i più performanti, seppure la temperatura percepita dall'uomo definita dall'UTCI risulti attorno ai 28 – 29 °C.



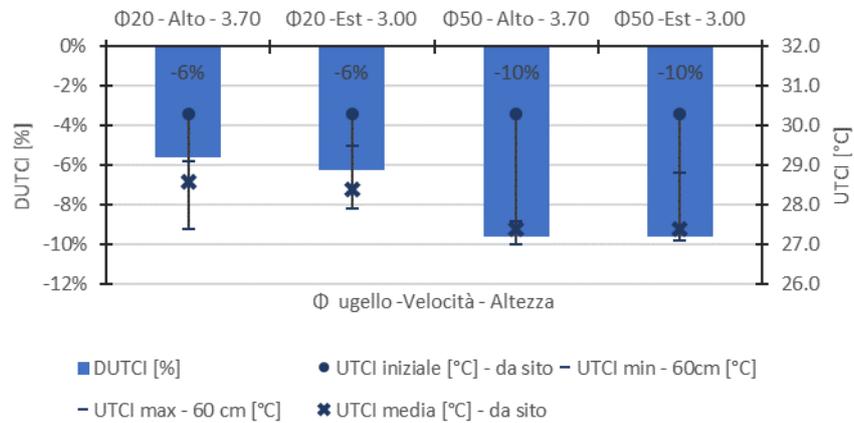
a)



b)



c)



d)

Figura 7. Variazione e valore puntuale dell'indice UTCI per differenti: iniettori (a), interassi (b), condizioni al contorno e altezza iniettori (c), dimensioni degli ugelli (d)

Per quanto riguarda la *cooling efficiency*, essa risulta superiore al 50% (valore minimo di riferimento per sistemi evaporativi [26]) solo per sistemi con portata di acqua di circa 2 kg/min (ovvero, 0,53 iniettori al m² con Φ 0,20 mm o Φ 0,50mm, oppure 1,07 iniettori al m² con Φ 0,15 mm).

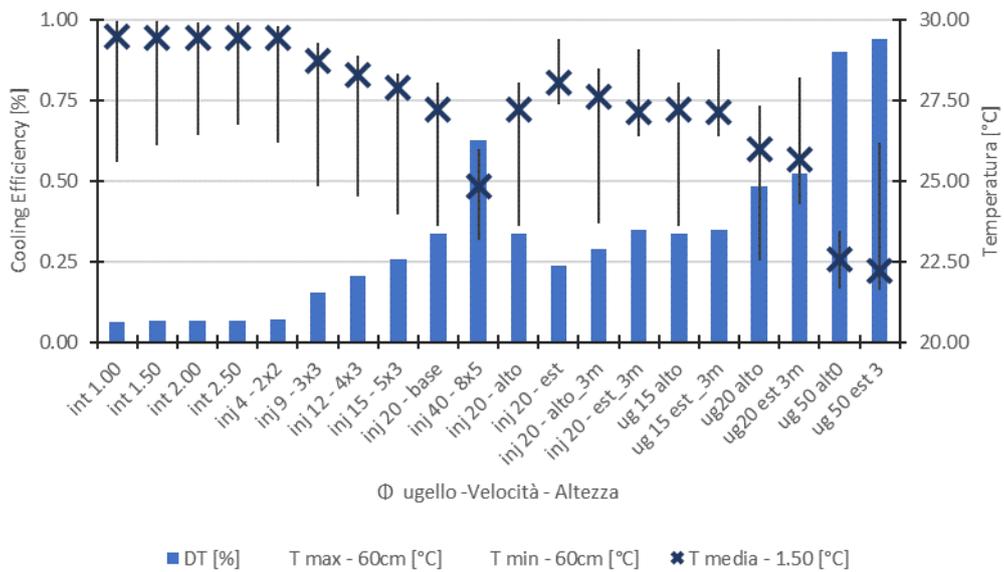
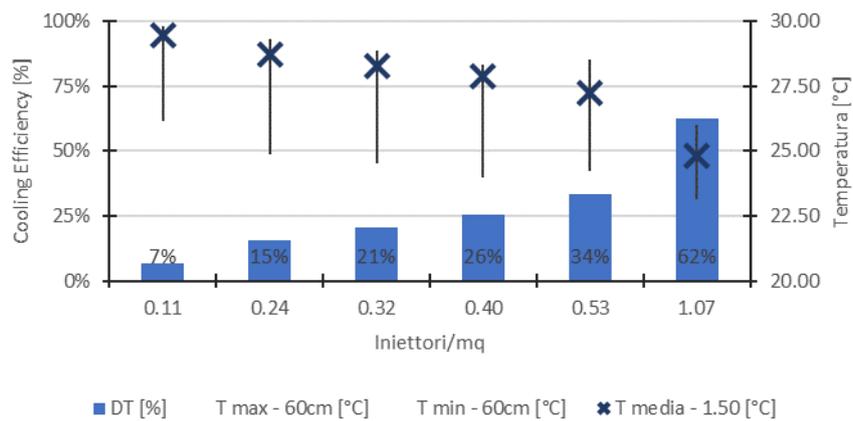


Figura 8. Variazione della *cooling efficiency* per differenti simulazioni

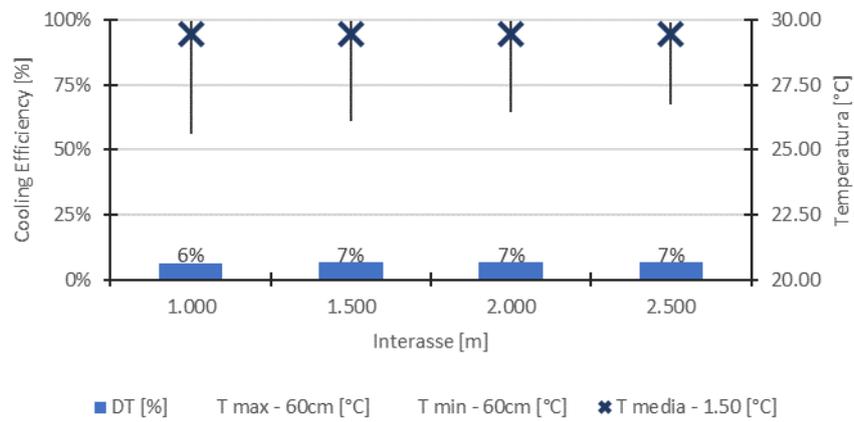
L'analisi parametro per parametro mostra invece che:

- anche la *cooling efficiency*, così come l'indice UTCI, varia meno che linearmente al variare del numero degli iniettori al metro quadrato o al variare del diametro dell'ugello, e non subisce variazioni significative al variare dell'interasse (Figura 9a, b, d);
- la *cooling efficiency* è simile per i sistemi "3,70 – alto" e "3,00 – est", seppure si nota una forte variazione tra la temperatura minima e massima registrata lungo l'asse X (Figura 9c).

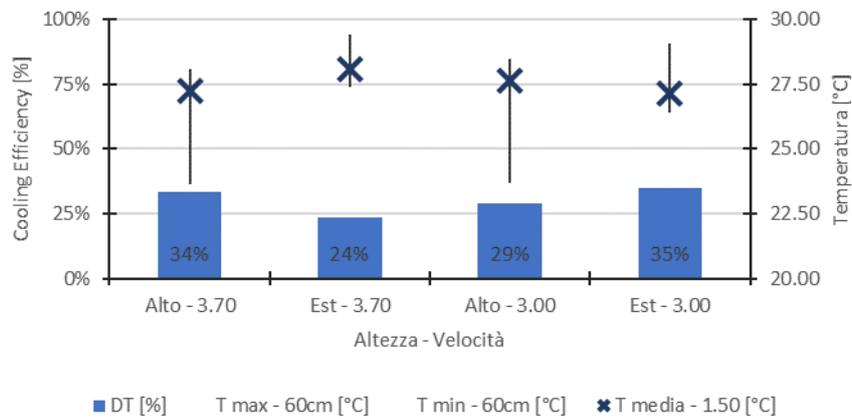
Anche la *cooling efficiency* evidenzia che i sistemi 1-4 sono i più performanti.



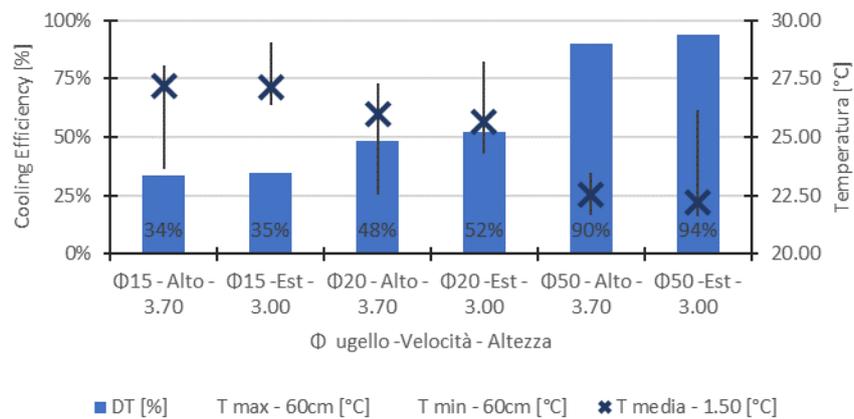
a)



b)



c)



d)

Figura 9. Variazione della *cooling efficiency* per differenti: iniettori (a), interassi (b), condizioni al contorno e altezza iniettori (c), dimensioni degli ugelli (d)

La Figura 10 mostra come la variazione di entalpia sia pressoché pari a 0 per tutte le simulazioni (si confrontino i cerchietti e le croci): questo dimostra che il sistema evaporativo è considerevole adiabatico. Inoltre, si nota come al crescere della portata di acqua immessa nel sistema (per numero maggiore di iniettori al m² o per maggiore diametro dell’ugello) aumenti la componente latente dell’entalpia.

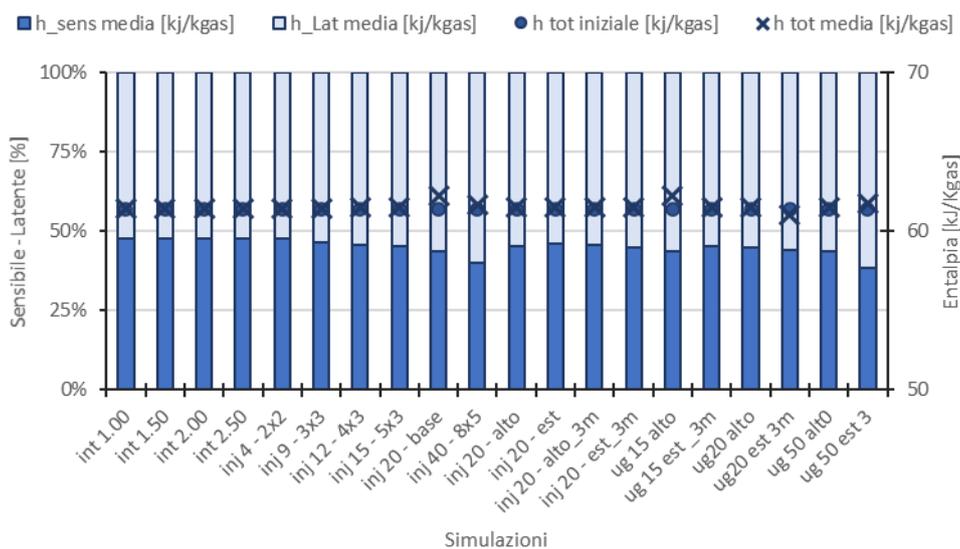
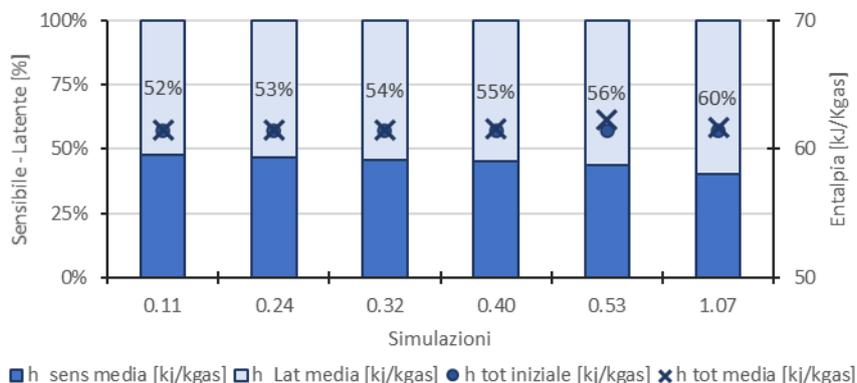


Figura 10. Variazione delle componenti sensibile/latente dell’entalpia dell’aria umida

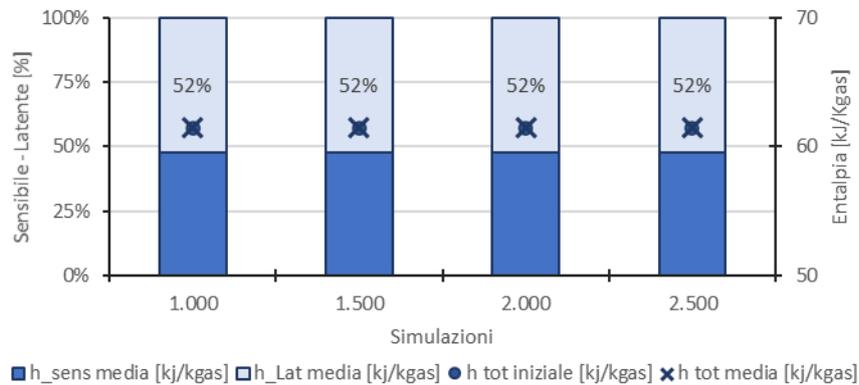
Se si analizzano i dati al variare di un singolo parametro alla volta, si vede inoltre che:

- la componente latente varia al variare della portata (ovvero per numero degli iniettori al metro quadrato o al variare del diametro degli ugelli, Figura 11a e Figura 11d);
- tutte le altre condizioni non sembrano influenzare il rapporto tra sensibile e latente (Figura 11b e Figura 11c).

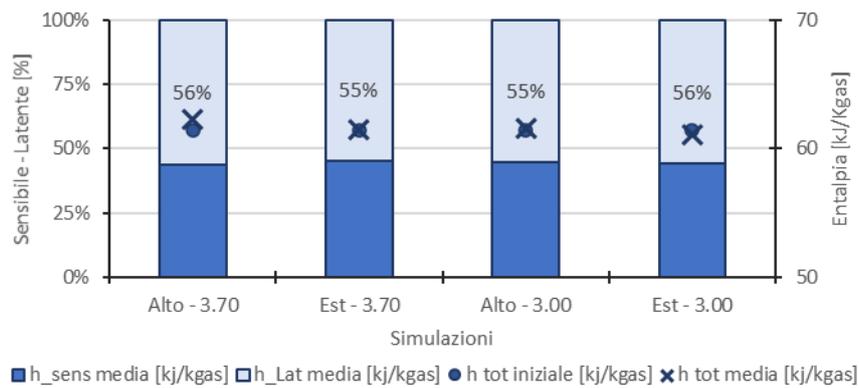
Per i sistemi 1-4 più performanti, la percentuale di componente latente è compresa tra il 56% e il 58%.



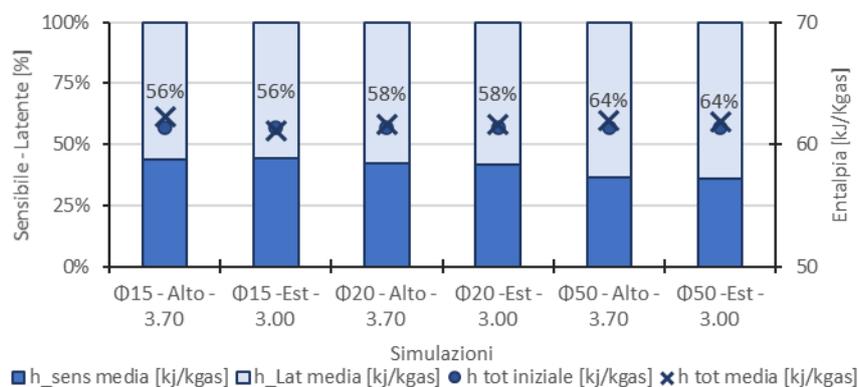
a)



b)



c)



d)

Figura 11. Variazione delle quote sensibile/latente dell'entalpia dell'aria umida per differenti: iniettori (a), interassi (b), condizioni al contorno e altezza iniettori (c), dimensioni degli ugelli (d)

Riepilogando, lo studio fluidodinamico di piccola scala ha evidenziato i seguenti risultati principali.

- Sono 4 le configurazioni che risultano essere le più performanti sia in termini di variazione delle grandezze termoigrometriche che in termini di comfort. La prima configurazione è composta da 20 iniettori posizionati a 3,70 m da terra quando c'è una velocità in ingresso dell'aria dall'alto. La seconda configurazione è composta da 20 iniettori posizionati a 3 m da terra quando c'è una velocità in ingresso dell'aria in direzione perpendicolare al getto di acqua nebulizzata. Entrambi i sistemi possono risultare più performanti se abbinati con ugelli di dimensione superiore (da Φ 0,15mm a Φ 0,20 mm).
- La riduzione di temperatura che si ottiene non comporta una variazione della classe di stress termico UTCI (che resta di "caldo moderato"), mentre la *cooling efficiency* varia tra il 35% ed il 50% per i sistemi considerati nel punto precedente. La componente latente dell'entalpia dell'aria umida varia tra il 56% ed il 58%.

2.2 Studio fluidodinamico a scala micro-urbana

Lo studio fluidodinamico a scala micro-urbana è stato condotto per comprendere l'impatto di varianti nella configurazione del sistema nebulizzante sui parametri climatici a livello locale. La modellazione e le simulazioni analitiche sono state realizzate con la software suite ENVI-met, utilizzata in più di 3000 articoli scientifici e studi indipendenti [18].

ENVI-met permette la simulazione dell'interazione tra superfici, vegetazione ed aria, e ad oggi è forse lo strumento maggiormente utilizzato per simulare ambienti urbani e valutare gli effetti sul microclima di diverse configurazioni architettoniche e paesaggistiche. In particolare, il software include un modello di calcolo CFD per la soluzione delle equazioni di Navier-Stokes e delle equazioni della termodinamica, in ogni cella nello spazio e ogni step temporale. La temperatura e umidità relativa dell'aria sono calcolate in relazione alle sorgenti di calore sensibile e vapore presenti nel dominio sulla base delle equazioni di avvezione-diffusione [18]. A differenza di altri software di CFD, ENVI-met è particolarmente adatto a rappresentare porzioni di aree cittadine non molto vaste, assimilabili alle dimensioni di un quartiere, operando ad un livello di micro-scala urbana per differenti configurazioni architettoniche e paesaggistiche. Il presente studio ha impiegato la versione del programma v. 4.4.3 Summer19 Science che consente di rappresentare l'operatività dei dispositivi "water spray" all'interno del modello [27]. La suite comprende diversi applicativi per la creazione del modello geometrico tridimensionale e la definizione delle proprietà termofisiche, per la gestione delle condizioni iniziali e al contorno, per la gestione dei parametri di simulazione e per l'analisi dei risultati.

Il modello del contesto urbano è stato validato a fronte dei dati raccolti durante una sperimentazione in situ condotta a Roma nell'estate del 2018. Varianti nella configurazione del sistema nebulizzante implementato nel modello sono state quindi introdotte per valutare l'effetto sull'estensione e l'intensità dell'azione raffrescante.

2.2.1 Metodologia

Tramite l'applicativo *Spaces* di ENVI-met si è ricostruita l'area di Roma in cui è stato realizzato il monitoraggio di un dispositivo di raffrescamento nel corso dell'estate 2018, come documentato nel report RdS/PAR2017/057 [17] (Figura 12 - sinistra).



Figura 12 Area modellata, in cui è stato costruito un sistema nebulizzante nell'estate 2018 (sinistra) e pianta con materiali del suolo implementati nel modello (destra)

Date le dimensioni (più di 800 m²) e le caratteristiche del luogo (un'area verde con edificazione densa su due lati, e due zone più aperte a nord e sud), e considerati i tempi di simulazione del programma, si è ritenuto sufficiente discretizzare un dominio di 50x50x30 celle (XxYxZ) di dimensione orizzontale 2 m. La discretizzazione lungo l'asse verticale Z è avvenuta tramite l'approccio "telescopico" implementato nel programma, ovvero partendo da un'altezza delle celle alla base di 0,5 m; dalla quota di 3 m si è quindi applicato un fattore di allungamento del 20% (fino ad una quota di circa 180 m). Sei ulteriori celle sono state inserite al bordo del dominio (*nesting grids*).

Sono state quindi definite le proprietà termofisiche dei componenti di involucro dei due principali edifici presenti nel sito in esame, sulla base di valori tabulati negli standard EN ISO 10456 [28] e UNI 10351 [29]. La chiesa (nella zona nord-ovest dell'area), edificata agli inizi degli anni '30, ha struttura in c.a., copertura con tegole in laterizio, e risulta intonacata su tre lati, mentre la facciata nord è rivestita in mattoni rossi. Il poliambulatorio (nella zona est) è un edificio degli anni '60 con struttura in c.a., tamponamenti a cassetta intonacati e copertura piana con guaina impermeabilizzante. Considerata l'epoca di costruzione dei due fabbricati, si presume che gli involucri siano privi di isolamento termico. La **Tabella 4** riporta le proprietà termofisiche e ottiche dei principali materiali di involucro degli edifici modellati.

Tabella 4. Parametri termofisici e ottici dei materiali di involucro degli edifici presenti nel modello

	spessore (m)	assorbanza solare (-)	trasmissione solare (-)	riflettanz a solare (-)	emissività termica (-)	calore specifico (J/kg·K)	conducibilità termica (W/m·K)	densità (kg/m ³)
Chiesa – pareti esterne (dall'interno all'esterno)								
Cartongesso	0.02	0.50	0.00	0.50	0.90	960	0.51	1120
Calcestruzzo	0.20	0.70	0.00	0.30	0.90	840	1.90	2500
Intonaco	0.02	0.50	0.00	0.50	0.90	840	0.80	1600
Laterizi (solo facciata nord)	0.30	0.60	0.00	0.40	0.90	650	0.44	1500
Chiesa – copertura (dall'interno all'esterno)								
Solaio in laterocemento	0.24	0.40	0.00	0.60	0.90	880	1.09	1100

Membrana impermeabilizzante	0.004	0.77	0.00	0.23	0.87	1000	0.85	2400
Tegole in laterizio	0.04	0.50	0.00	0.50	0.90	840	0.81	1700
Finestre								
Vetro	0.02	0.05	0.90	0.05	0.90	750	1.05	2500
Poliambulatorio – pareti esterne (dall'interno all'esterno)								
Intonaco	0.02	0.50	0.00	0.50	0.90	840	0.80	1600
Laterizi forati	0.08	0.67	0.00	0.33	0.92	840	0.25	800
Aria	0.04	0.00	1.00	0.00	0.96	1006	0.025	1.204
Laterizi semipieni	0.25	0.67	0.00	0.33	0.95	840	0.25	800
Intonaco	0.02	0.50	0.00	0.50	0.90	840	0.80	1600
Poliambulatorio – copertura (dall'interno all'esterno)								
Solaio in laterocemento	0.24	0.40	0.00	0.60	0.90	880	1.09	1100
massetto	0.05	0.73	0.00	0.27	0.93	1000	0.22	1490
Membrana impermeabilizzante	0.004	0.77	0.00	0.23	0.87	1000	0.85	2400
Edificio prefabbricato annesso al poliambulatorio (pareti e copertura, dall'interno all'esterno)								
Cartongesso	0.0125	0.50	0.00	0.50	0.90	840	0.16	800
Lana minerale	0.04	0.60	0.00	0.40	0.90	1256	0.04	30
Cartongesso	0.0125	0.50	0.00	0.50	0.90	840	0.16	800
Lamiera	0.002	0.20	0.00	0.80	0.10	4800	45	800

Le specie arboree presenti nell'area (tigli, pini, platani e robinie) sono state modellate all'interno dell'applicativo *Albero* di ENVI-met, in modo di riprodurre con buona approssimazione la geometria e l'altezza. Le caratteristiche principali relative alle specie sono riportate in [Tabella 5](#).

Tabella 5. Caratteristiche relative alla tipologia di alberi presenti nel sito

Nome latino	Rapporto dell'aspetto	Albedo fogliame	del	Trasmittanza ad onde corte del fogliame	Tipo di foglia
Tilia cordata	1.45	0.18		0.30	Decidua
Tilia cordata	1.56	0.18		0.30	Decidua
Pinus Pinea	1.45	0.60		0.30	Conifera
Platanus Acerifolia	1.33	0.18		0.30	Decidua
Robinia Pseudoacacia	1.71	0.18		0.30	Decidua

All'interno del database *Plants* del software sono stati definiti i principali parametri termofisici ed ottici dei manti erbosi presenti all'interno dell'area di studio (**Figura 12**-destra, **Tabella 6**). I valori di albedo sono stati ricavati dalle indicazioni fornite dalla norma UNI 8477 [30], mentre quelli di trasmittanza si riferiscono ai valori di default del software.

Tabella 6. Caratteristiche relative al manto erboso del suolo

Manto erboso	Albedo	Trasmittanza ad onde corte del fogliame	Altezza (m)
Erba verde densa	0.26	0.30	0.25
Erba secca	0.20	0.30	0.10

Per completare la geometria del modello, sono state quindi definite le altre tipologie di superfici di suolo presenti nell'area di studio (**Figura 12**-destra), a partire dai dati inclusi nel database *Soils*. I parametri relativi al terreno sono stati ricavati tramite lo schema idraulico di *Clapp & Hornberger* [31], che consente di descrivere la conducibilità termica del terreno in funzione del suo contenuto d'acqua. Il profilo stratigrafico del suolo per uno spessore di 4,5 m è stato definito sulla base di documentazioni reperibili sul sito dell'ISPRA [32]. Nella **Tabella 7** sono riportate le caratteristiche fisiche, idrauliche ed ottiche delle tipologie di suolo considerate nel modello.

Tabella 7. Caratteristiche fisiche, idrauliche ed ottiche delle tipologie di suolo considerate nel modello. La sigla V indica il tipo di suolo: 0 se è permeabile, 1 se è impermeabile; n_s è il contenuto volumetrico di acqua in condizioni di saturazione; n_{fc} è il contenuto volumetrico di acqua con riferimento alla capacità del terreno; n_{wilt} è il contenuto volumetrico di acqua in corrispondenza del punto di appassimento; la matrice potenziale *MatPot* tiene conto delle forze adesive intermolecolari tra l'acqua ed il materiale solido con cui la stessa è a contatto; *hydr* è la conducibilità idraulica alla saturazione; *CP* è la capacità termica volumetrica; *b* è la costante di Clapp ed Hornberger; λ è la conducibilità termica del materiale di superficie; i valori di albedo (ρ) ed emissività (ϵ) derivano da UNI 8477 [30] e letteratura [33]

Tipo di suolo	V	n_s (m^3/m^3)	n_{fc} (m^3/m^3)	n_{wilt} (m^3/m^3)	MatPot (m)	hydr ($10^{-6}m/s$)	CP ($10^6J/m^3K$)	b (-)	λ (W/mK)	ϵ (-)	ρ (-)
Terra	0	0.451	0.240	0.155	-0.478	7	1.212	5.39	0.00	0.98	0.00
Cemento	1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.083	0.00	1.63	0.90	0.22
Asfalto: -vecchio	1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.214	0.00	1.16	0.90	0.10
-nuovo	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.98	0.04
-rosso	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.93	0.07

Infine, all'interno dell'area di studio sono stati definiti i "recettori", ovvero le colonne di volumi discreti sovrastanti specifiche celle in cui vengono forniti i risultati puntuali delle simulazioni, in termini di dati atmosferici, flussi radiativi scambiati e caratteristiche del terreno. In **Figura 13** sono individuati i 12 ricettori posti nell'area nebulizzata e i sensori utilizzati durante la sperimentazione. Un altro ricettore è stato collocato in corrispondenza della stazione climatica della sperimentazione, in area "indisturbata".

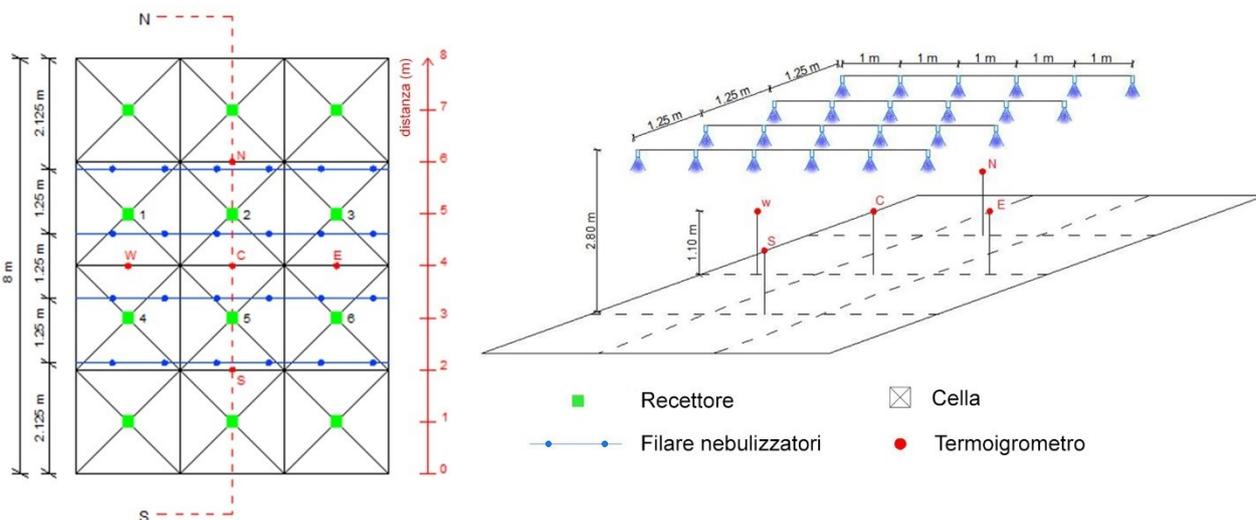


Figura 13. Schema dell’area nebulizzata: individuazione della posizione degli ugelli e sensori usati durante la sperimentazione e dei recettori, in corrispondenza delle celle del modello. I termoigrometri (sensori per la misura di temperatura e umidità relativa dell’aria) sono identificati da lettere in relazione alla loro posizione: N (nord), C (centro), S (sud), W (ovest), E (est)

I nebulizzatori in ENVI-met possono essere inseriti come “sorgenti d’acqua” localizzate al centro delle celle. Poiché nel modello realizzato le celle hanno dimensioni 2 m x 2 m, è stato necessario adeguare il numero degli ugelli alle dimensioni delle celle, mantenendo ovviamente inalterata la superficie della zona nebulizzata complessiva (rappresentata da 6 celle). Si sono quindi inserite 6 sorgenti d’acqua ad una altezza di 2,80 m (come nella sperimentazione), ciascuna corrispondente a 4 ugelli reali, per una portata d’acqua complessiva di 90 l/h (15 l/h per ogni sorgente). Le caratteristiche delle sorgenti sono state impostate nella sezione del programma con i settaggi avanzati “pollutant conditions”. Qui si è definito il tipo di sorgente “water spray”, un diametro di particelle pari a 5 µm [34] e una densità dell’acqua di 1 g/cm³. Si è imposto un periodo di attivazione delle sorgenti dalle 11:00 alle 19:00, così come nelle condizioni sperimentali condotte a Roma.

I settaggi necessari all’avvio della simulazione vengono definiti attraverso la creazione di un file di configurazione all’interno di ENVIguide, in questo caso definito nel “livello avanzato”. Tra le varie giornate in cui è stata condotta la campagna di misurazione sperimentale, si è scelto di simulare le condizioni climatiche del 25 agosto, per la elevata temperatura dell’aria (media superiore ai 33 °C durante le ore centrali della giornata), l’assenza di nubi e il funzionamento continuo del sistema nebulizzante per l’intero arco della giornata. Poiché il modello numerico necessita di un tempo di inizializzazione, l’ora di avvio è stata impostata alle 05:00 del mattino e la durata di 48 ore. Sono stati quindi presi in considerazione i soli risultati relativi al secondo giorno di simulazione. Si è quindi impostata l’opzione “simple forcing”, per imporre al contorno i valori di temperatura e umidità relativa misurati dalla stazione climatica durante le ore di sperimentazione (11:00 – 19:00), mentre i dati per le restanti ore della giornata sono stati ricavati da una vicina stazione meteorologica [35]. I profili di temperatura (*Ta*) e umidità relativa (*RH*) sono riportati in [Figura 14](#).

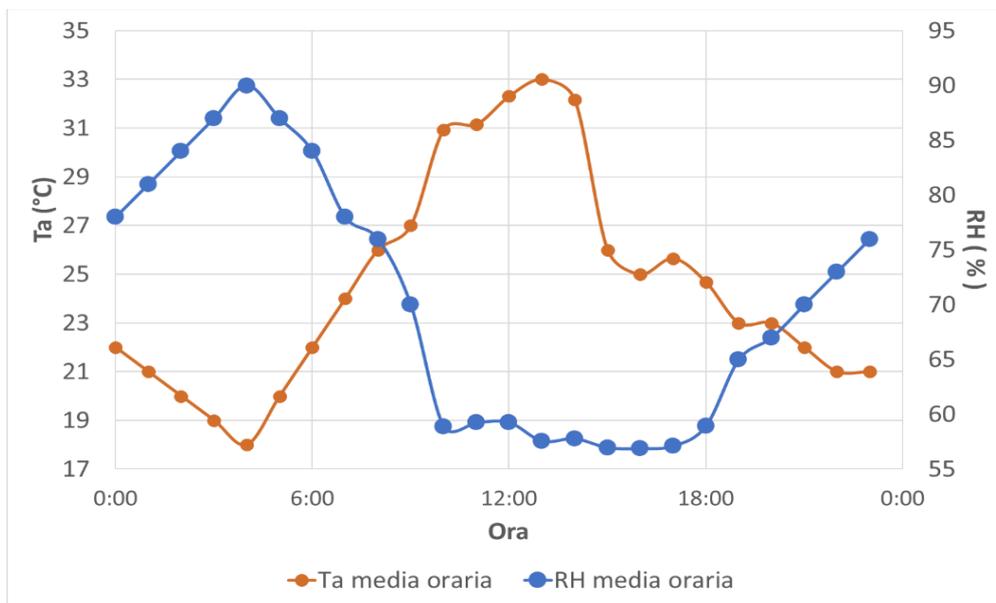


Figura 14. Profili di temperatura e umidità relativa dell'aria impostati nel programma

Le condizioni meteorologiche iniziali e i settaggi avanzati del suolo sono riportati in **Tabella 8**. In particolare, la lunghezza di rugosità aerodinamica è stata impostata considerando i valori in [36], [37] per un'area suburbana. È stato imposto un valore di velocità del vento a 10 m di altezza pari a 2,4 m/s, considerando il valore di velocità media registrato al suolo dalla stazione climatica (1,2 m/s) e la formula di Camacho et al. [38]. Per stimare la direzione del vento si è analizzata la distribuzione di frequenza delle direzioni durante la giornata monitorata. I valori di velocità e direzione del vento imposti hanno trovato conferma nei dati disponibili online rilevati da una vicina stazione climatica [35]. Le condizioni iniziali di temperatura del suolo sono state imposte in accordo con [39], mentre per l'umidità relativa sono stati considerati i valori di default nel programma. Il passo temporale di simulazione è regolato automaticamente da ENVI-met considerando i differenti angoli solari durante il giorno: 2 secondi sotto la soglia di 50 gradi e 1 secondo sopra questo valore. L'output delle simulazioni è stato fornito dal programma ogni 30 minuti per i recettori e ogni 60 minuti per tutte le restanti celle.

Tabella 8 Parametri climatici e condizioni del suolo iniziali

Parametri climatici iniziali	Valore	
Vento	misurato a 10 m di altezza (m/s)	2.40
	direzione (°)	225
	lunghezza di rugosità aerodinamica	0.30
Temperatura dell'aria	min. (°C)	18
	max. (°C)	33.01
Umidità Relativa	min. (%)	56.90
	max. (%)	90
Temperatura dell'aria all'interno degli edifici	valore iniziale (°C)	26

Copertura nuvolosa		0.00
Condizioni iniziali del suolo		
	Umidità del suolo (%)	Temperatura iniziale (°C)
Livello superiore (0-20 cm)	70	25.85
Livello intermedio (20-50 cm)	75	24.85
Livello inferiore (50-200 cm)	75	19.85
Livello profondo (sotto 200 cm)	75	17.85

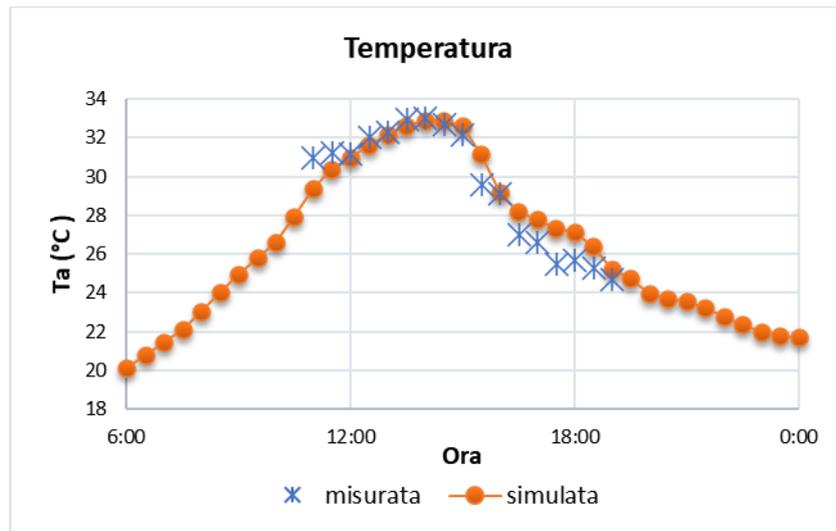
Una volta definiti tutti i parametri di ingresso, si sono svolte le simulazioni. I risultati ottenuti nei recettori, in termini di temperatura dell'aria (T_a) ed umidità relativa (RH) sono stati quindi comparati con i dati sperimentali raccolti, sia in "ambiente nebulizzato" (AN), sia in "ambiente indisturbato" (AI), ovvero la zona in cui era collocata la stazione climatica. Il modello validato è stato quindi utilizzato, in primo luogo, per valutare l'impatto del sistema nebulizzante sulle condizioni micro-climatiche dell'area, e specialmente per quantificare l'effetto di raffrescamento ottenibile rispetto allo stesso ambiente indisturbato (non nebulizzato). In secondo luogo, si sono condotte analisi di sensibilità sui risultati in relazione alle seguenti varianti introdotte nel modello validato:

- tre valori di portata d'acqua, ottenuti raddoppiando e dimezzando il numero di ugelli nebulizzanti nella stessa area (quindi si sono valutate portate complessive di 180 l/h, 90 l/h e 45 l/h);
- tre altezze degli ugelli, considerando altezze superiori e inferiori di mezzo metro rispetto al caso di base (quindi 2,30 m, 2,80 m, 3,30 m);
- quattro velocità del vento (1 m/s, 1,2 m/s, 2 m/s, 3 m/s).

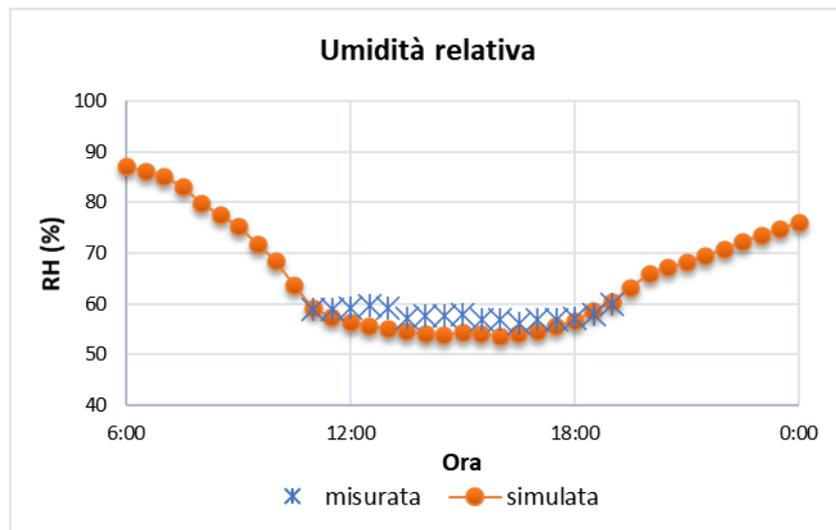
La combinazione di tutte le varianti ha generato 36 modelli, che sono stati simulati nelle stesse condizioni iniziali e al contorno.

2.2.2 Risultati

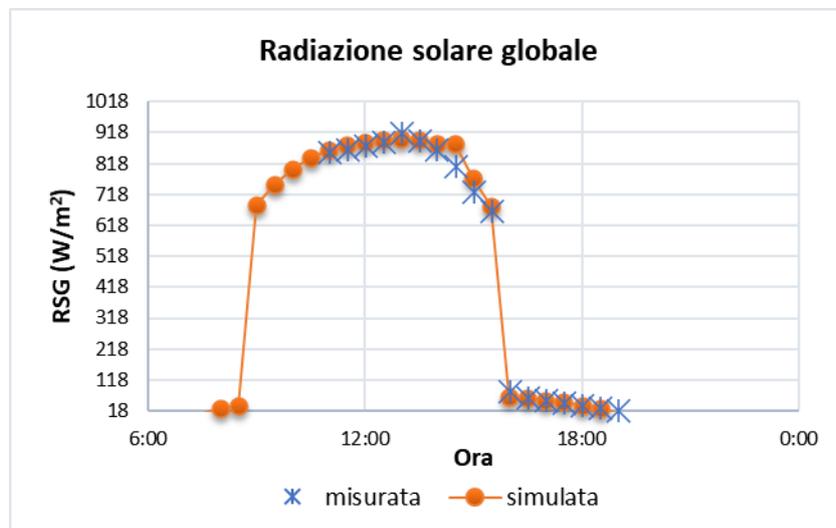
La validazione del modello in ENVI-met è stata realizzata comparando i dati sperimentali misurati con quelli ottenuti dalle simulazioni per le zone nebulizzata e indisturbata. La [Figura 15](#) riporta i valori di temperatura e umidità relativa dell'aria, e di radiazione solare globale (RSG) misurati dalla stazione climatica e quelli ottenuti dalla simulazione (valore medio tra quelli ottenuti all'altezza di 0,5 m e 1,5 m, per approssimare l'altezza della stazione climatica). Si può osservare come i valori simulati di T_a e RSG rappresentino una buona stima degli andamenti reali, soprattutto nelle ore centrali e più calde della giornata. La RH media risulta invece sistematicamente sottostimata dal modello, come ampiamente riportato anche in ricerche precedenti, in relazione ai limiti del modello nella stima di emissioni antropiche e traspirazione delle piante [40], [41]. Come dimostrato anche dai dati statistici sulla accuratezza ([Tabella 9](#)), si può ritenere il modello in ambiente indisturbato in grado di approssimare sufficientemente bene i dati sperimentali. La radice dell'errore quadratico medio rientra nell'intervallo comunemente riportato in letteratura (2,04% - 10,20%) [42].



a)



b)



c)

Figura 15. Confronto tra valori di temperatura (a) e umidità relativa (b) dell'aria, e di radiazione solare globale (c) simulati e misurati dalla stazione climatica

Tabella 9. Dati statistici sull'accuratezza del modello in ambiente indisturbato: coefficiente di Pearson (R²), radice dell'errore quadratico medio (RMSE) e indice di Willmott (d) [43], [44]. L'affidabilità aumenta per R²→1, RMSE→0, d→1

	R ²	RMSE	d
Ta	0.93	0.98	0.97
RH	0.29	2.7	0.38

Per quanto riguarda la validazione del modello in ambiente nebulizzato, si sono confrontati tutti i valori di Ta misurati dai termoigrometri tra le ore 11:00 e le 19:00 con quelli ottenuti dai recettori nelle simulazioni (valori medi tra celle in prossimità della posizione dei termoigrometri). La validazione si è quindi basata su 85 coppie di valori (17 per ogni punto) (Figura 16). I valori statistici (Tabella 10) indicano un forte accordo tra Ta simulata e misurata: R² varia da 0,81 a 0,93 a seconda del punto di misura, con una media di 0,87, mentre d varia da 0,93 a 0,98, con una media di 0,96. L'RMSE non supera mai 0,99 °C ed è in media 0,84 °C.

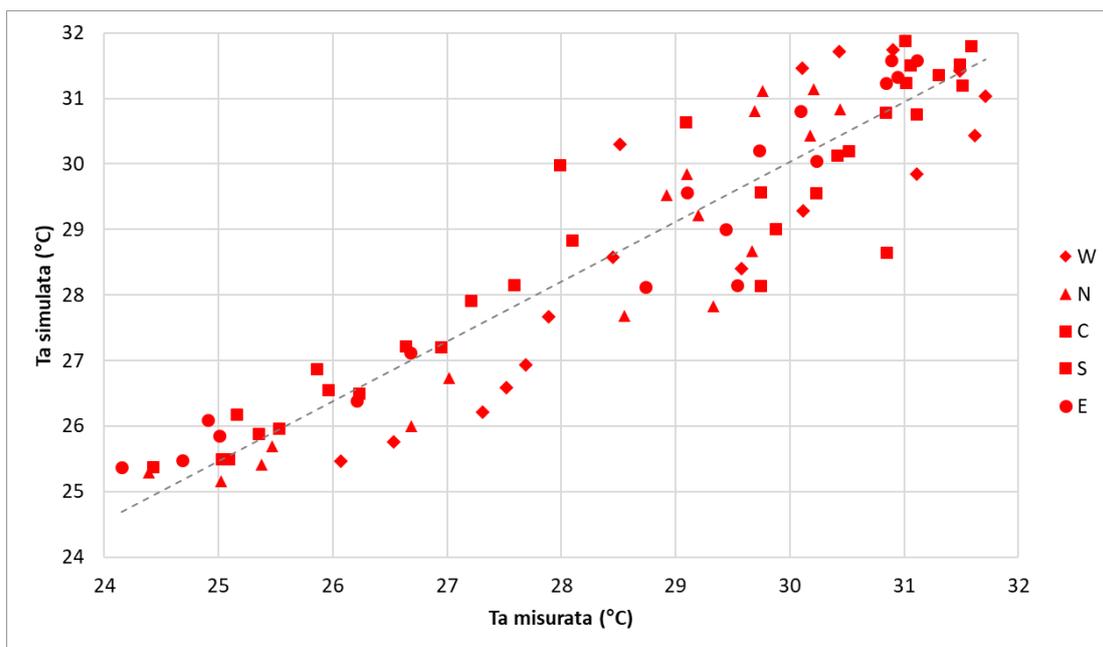


Figura 16. Confronto tra valori di temperatura misurata e simulata (media dei valori nei recettori vicini alla posizione dei termoigrometri)

Tabella 10. Dati statistici sull'accuratezza del modello in ambiente nebulizzato: coefficiente di Pearson (R²), radice dell'errore quadratico medio (RMSE) e indice di Willmott (d) [43], [44]. L'affidabilità aumenta per R²→1, RMSE→0, d→1

	R ²	RMSE (°C)	d
Ta (N)	0.87	0.79	0.96
Ta (S)	0.88	0.87	0.96

Ta (W)	0.81	0.99	0.93
Ta (C)	0.91	0.80	0.97
Ta (E)	0.93	0.73	0.98
Ta (media di tutti i punti)	0.87	0.84	0.96

Andando ad osservare l'andamento della T_a simulata e misurata al centro dell'area nebulizzata (Figura 17), si può notare come nelle ore centrali della giornata (tra le 12:00 e le 15:00) la differenza tra le due temperature è sempre inferiore a 0,5 °C. Alle 15:30, la T_a misurata diminuisce improvvisamente a causa della parziale ombreggiatura della chioma di un albero. Sebbene la simulazione non riesca a rappresentare questo fenomeno transitorio, entro un'ora l'allineamento tra le due temperature risulta ripristinato.

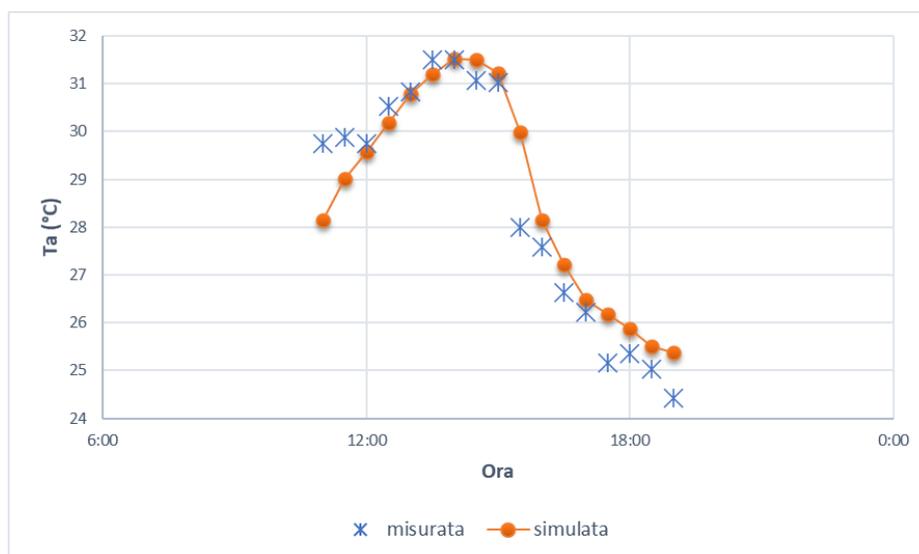
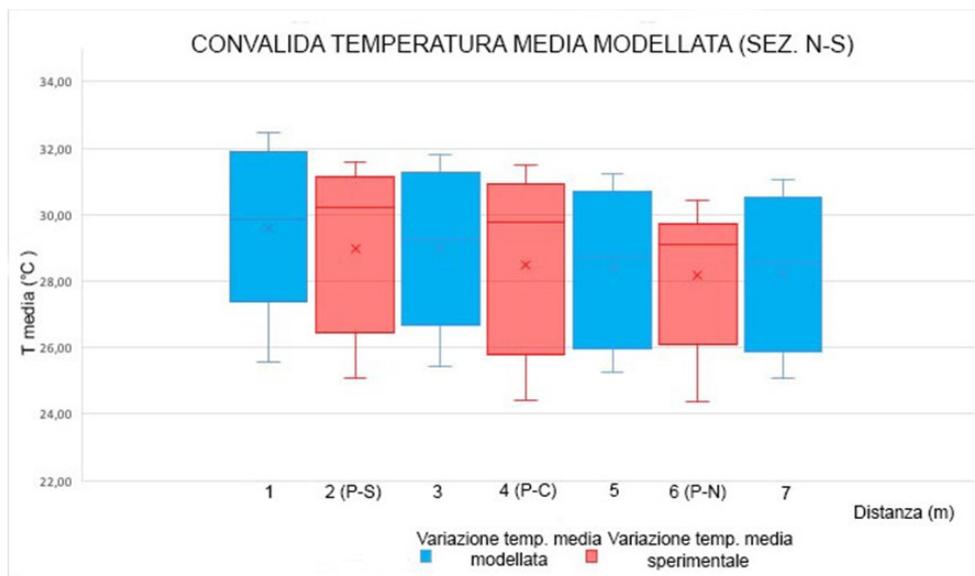
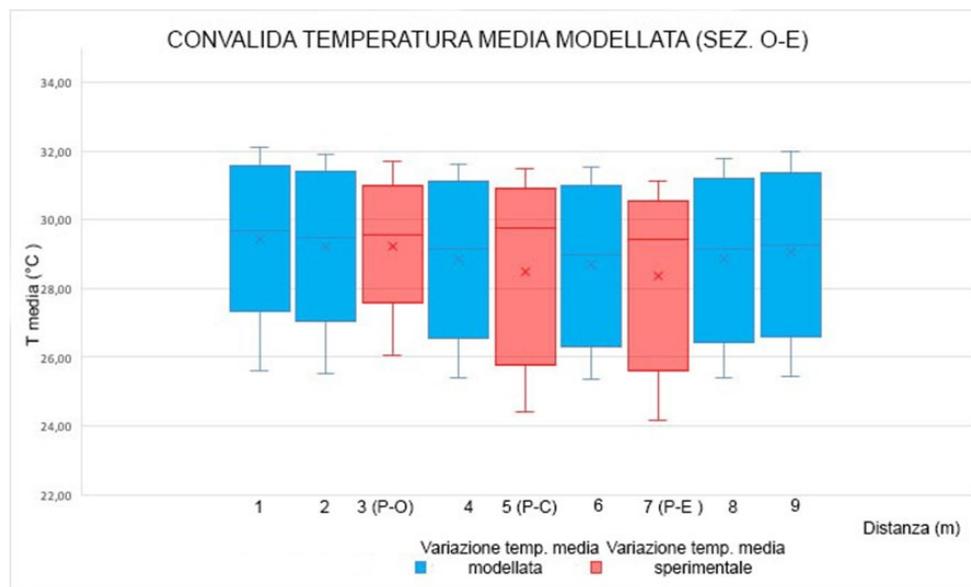


Figura 17. Confronto tra valori di temperatura simulati e misurati al centro dell'area nebulizzata, nel periodo 11.00-19.00

Infine, la Figura 18 mostra i *box-plot* della distribuzione di temperatura misurata e simulata lungo le principali sezioni dell'area nebulizzata (nord-sud e ovest-est, passando per il centro), utili a valutare gli andamenti nello spazio. Dall'analisi dei valori sperimentali nella sezione nord-sud (grafico a, *box-plot* in blu), registrati dai termoisgrometri nei punti S (sud), C (centro), N (nord), si osserva che la T_a decresce seguendo la direzione del vento da sud a nord, proprio grazie al trasporto delle microparticelle d'acqua. Il fenomeno viene anche correttamente interpretato dalla simulazione (*box-plot* in rosso). Lo scarto tra le mediane delle T_a nelle posizioni dei termoisgrometri S e N (a 4 m di distanza) è di circa 0,8 °C, mentre quello calcolato nei recettori più meridionale e più settentrionale (a 6 m di distanza) raggiunge 1,35 °C. Dall'analisi delle distribuzioni delle T_a lungo la sezione ovest-est (grafico b) emerge un abbassamento delle stesse in corrispondenza del centro dell'area nebulizzata, con differenze rispetto ai margini di circa 1 °C.



a)



b)

Figura 18. Box-plot della distribuzione di temperatura misurata (rosso) e simulata (blu) lungo la sezione Nord-sud (a) e Ovest-Est (b)

Una volta validato il modello ENVI-met sia in area indisturbata che in area nebulizzata, si sono condotte con esso simulazioni volte a fornire l’andamento delle temperature nell’intero contesto urbano, sia in presenza che in assenza del sistema nebulizzante. I risultati delle simulazioni microclimatiche effettuate con ENVI-met sono stati elaborati usando l’applicativo *Leonardo*, in grado di realizzare delle mappe termiche del contesto urbano analizzato. La **Figura 19** mostra la distribuzione spaziale della differenza di temperatura (ΔT_a) ottenuta nel dominio di simulazione in presenza o meno del sistema nebulizzante, a 1,25 m di altezza (centro della cella più vicino all’altezza dei termoigrometri) e a 1,75 m (altezza di riferimento di una persona in piedi). Le mappe termiche si riferiscono alle ore 14:00. La temperatura varia da circa 31 °C a circa 34 °C, coerentemente con le registrazioni della stazione meteorologica. I valori più alti si registrano nell’area asfaltata a sud-est del dominio, mentre quelli più bassi corrispondono all’area verde a nord-est. La zona sottostante i getti

nebulizzanti e quella ad essa circostante sono le uniche a subire consistenti variazioni di temperatura: lo scarto termico medio derivante dall'effetto evaporativo è più intenso al di sotto dei "water spray" e tende ad estendersi per qualche metro verso nord-est, coerentemente con la direzione del vento e con un'intensità che gradualmente va scemando. Ad un'altezza di 1,25 m, a 2 m di distanza dal recettore Sud, ΔT_a raggiunge il picco di 1,98 °C. Il raffreddamento evaporativo si propaga in direzione nord-est, seguendo il vento, con riduzioni dell'ordine di 0,3 - 0,5 °C fino a circa 24 m di distanza dall'area nebulizzata. Ad un'altezza di 1,75 m, le deviazioni termiche medie sono maggiori poiché vengono rilevate più vicino agli ugelli, ma il massimo, registrato nella stessa posizione, è solo leggermente superiore (2 °C).

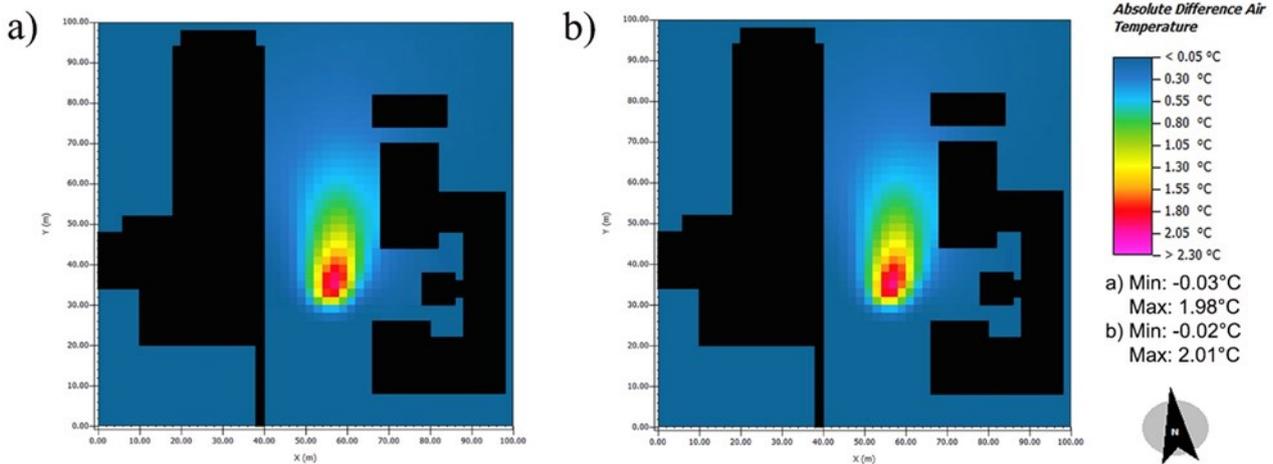
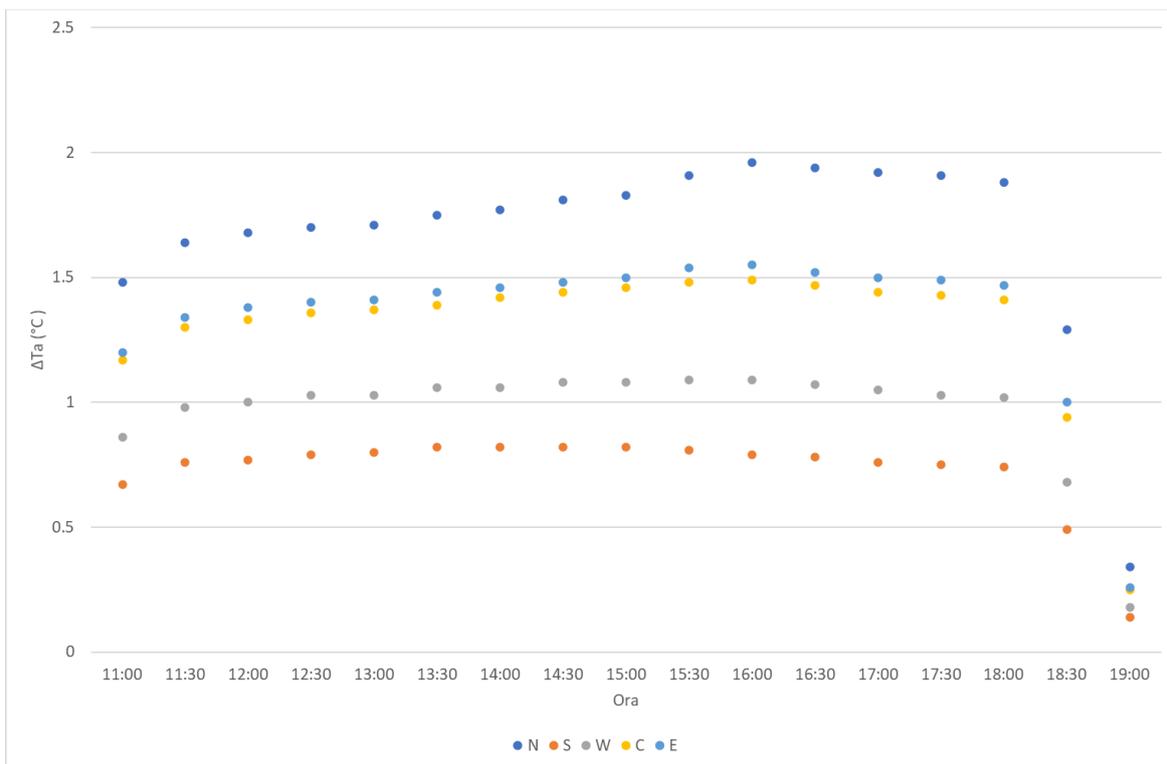
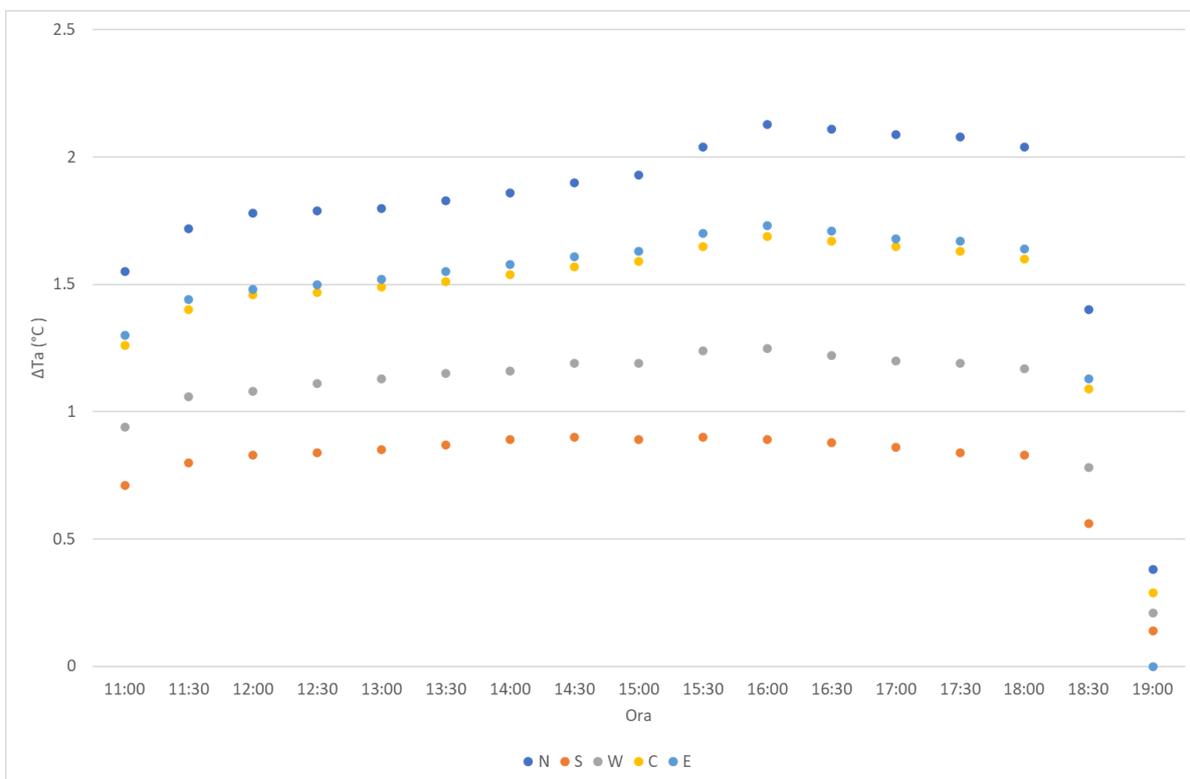


Figura 19. Differenza di temperatura indotta dalla presenza del sistema nebulizzante nell'area analizzata, all'altezza di 1,25 m (a) e di 1,75 m (b) alle ore 14.00

La **Figura 20** mostra l'andamento giornaliero del ΔT_a nell'area di prova a 1,25 m (**Figura 20a**) e a 1,75 m (**Figura 20b**) dal suolo, calcolato come media dei valori nei recettori più vicini alle località N, S, W, C ed E. È possibile osservare, per tutti i punti, un andamento simile dello scarto di temperatura: generalmente la differenza più rilevante si verifica durante le ore più calde della giornata. Infatti, quando la temperatura dell'aria aumenta, l'evaporazione diventa più evidente. La differenza di T_a si attenua considerevolmente a partire dalle 18:00, per poi annullarsi al termine del periodo di attivazione del sistema nebulizzante (ore 19:00). All'altezza di 1,25 m (**Figura 20a**), la massima caduta di temperatura si osserva in corrispondenza del punto N, dove raggiunge valori massimi di poco inferiori a 2 °C. Seguono, con andamento pressoché sovrapposto, i punti E e C, in cui durante le ore centrali della giornata gli scarti termici superano 1,5 °C, e quindi il punto O (scarti attorno a 1 °C). In corrispondenza del punto S, si osservano gli scostamenti più ridotti (inferiori a 1 °C) e con andamento pressoché costante durante l'attivazione del sistema. Tali risultati confermano quanto rilevato sull'influenza della direzione del vento che, trascinando le microparticelle di acqua verso nord-est, determina in quella zona del sito un maggior effetto di raffreddamento locale. All'altezza di 1,75 m (**Figura 20b**), le differenze termiche indotte dal sistema di nebulizzazione sono leggermente superiori, ma con una distribuzione spaziale simile a quanto già rilevato all'altezza di 1,25 m.



a)



b)

Figura 20. Andamento delle differenze di temperatura simulate tra ambiente nebulizzato e ambiente indisturbato (ΔT_a) in corrispondenza dei punti N, S, W, C, E, all'altezza di 1,25 m (a) e 1,75 m (b)

Il grafico in **Figura 21** conferma quanto rilevato. I *box-plots* degli scarti termici simulati durante l'intervallo di attivazione del sistema nebulizzante lungo la sezione S-N evidenziano sia il maggior effetto raffrescante, che la maggior dispersione dei dati, procedendo da sud verso nord nell'area nebulizzata.

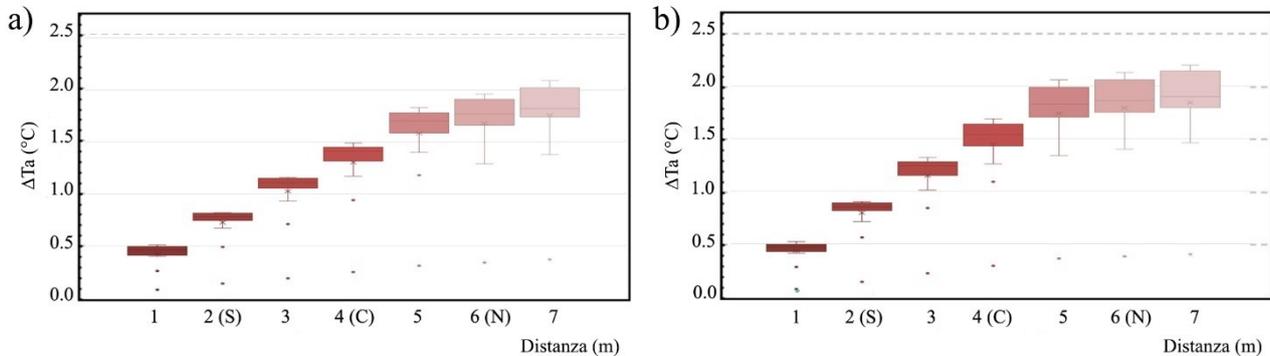


Figura 21. Box-plots delle ΔT_a simulate durante l'intervallo di attivazione del sistema nebulizzante lungo la sezione S-N all'altezza di 1,25 m (a) e di 1,75 m (b)

La **Figura 22** sintetizza i risultati delle simulazioni condotte col modello validato per 36 configurazioni derivanti dalla combinazione delle diverse alternative progettuali (altezza ugelli, portata d'acqua, velocità del vento). La figura riporta, per ogni simulazione, il valore massimo di ΔT_a (alle ore 14:00) nel punto di maggior scarto termico (nord-est dell'area nebulizzata), all'altezza di 1,25 m. Come atteso, ΔT_a aumenta con la portata dell'acqua, cioè con il numero di ugelli nebulizzanti nell'area, e diminuisce al crescere dell'altezza del sistema (distanza dal terreno). In relazione ai grafici più a sinistra e più a destra in Figura 12, rispetto al caso base, il potenziale di mitigazione diminuisce di 0,1-0,5 °C quando l'altezza degli ugelli raggiunge i 3,3 m e aumenta di 0,1-0,7 °C quando l'altezza si riduce a 2,3 m. Dai grafici emerge inoltre che il potenziale di mitigazione del sistema nebulizzante diminuisce all'aumentare della velocità del vento. In particolare, quando la velocità del vento aumenta fino a 2 m/s, la diminuzione media del potenziale di raffrescamento è di circa il 35-40%, indipendentemente dalla portata dell'acqua. Quando l'altezza degli ugelli è di 2,8 m, per temperature ambientali attorno ai 33 °C, un aumento della portata d'acqua di 10 l/h determina un aumento di ΔT_a di circa 0,2 °C per basse velocità del vento (1-1,2 m/s), 0,1 °C per velocità di 2 m/s e inferiore per velocità superiori.

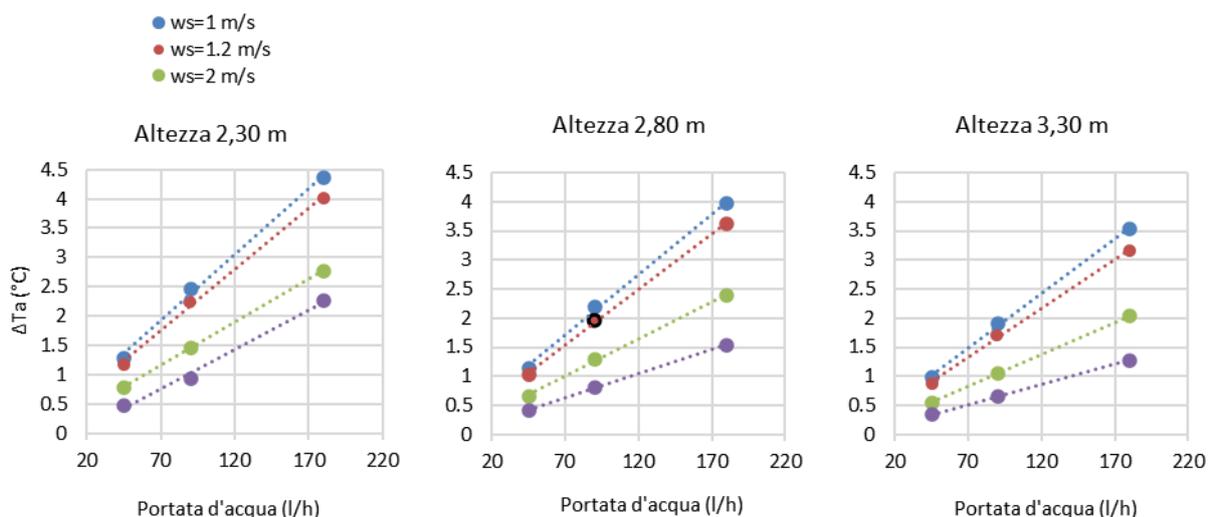


Figura 22. Massimo ΔT_a simulato alle ore 14:00 nel punto a nord-est dell'area nebulizzata e all'altezza di 1,25 m, in funzione di portata d'acqua (asse x), velocità del vento (diversi colori), altezza degli ugelli (diversi grafici)

Ciò risulta visibile anche nelle nuove mappe termiche di **Figura 23**, rispetto a quelle riportate in **Figura 19**. Qui si mostra la ΔT_a a 1,25 m e 1,75 m, nel modello con doppia portata d'acqua rispetto al caso base, altezza del sistema pari a 2,80 m, e velocità del vento di 1 m/s (**Figura 23a e b**) e 3 m/s (**Figura 23c e d**). In presenza di maggiore portata e minore velocità del vento (**Figura 23a e b**), l'effetto di raffreddamento è notevolmente potenziato. D'altra parte, velocità del vento più elevate (**Figura 23c e d**) estendono l'area di influenza del sistema, fornendo così il raffreddamento a un numero potenzialmente più ampio di utenti, anche se in modo più mite. Il profilo verticale della ΔT_a registrato alle due altezze di 1,25 m e 1,75 m appare piuttosto simile.

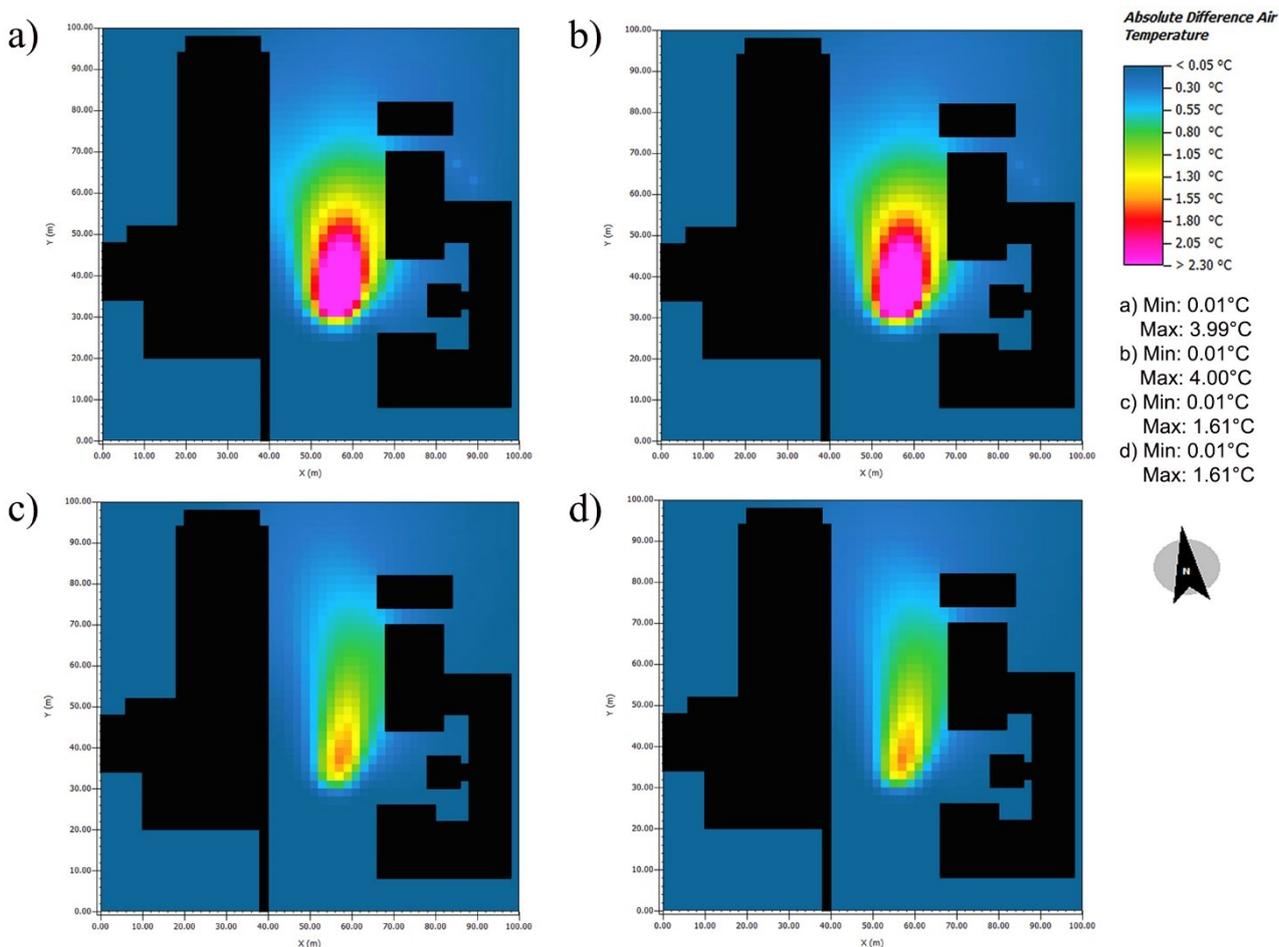


Figura 23. Differenza di temperatura indotta dalla presenza del sistema nebulizzante nell'area analizzata alle ore 14:00 con le seguenti condizioni: altezza degli ugelli di 2,80 m, doppia portata d'acqua rispetto al caso base (180 l/h), velocità del vento di 1 m/s all'altezza di 1,25 m (a) e di 1,75 m (b), velocità del vento di 3 m/s all'altezza di 1,25 m (c) e di 1,75 m (d)

Simili mappe termiche sono state estrapolate per i modelli con altezza del sistema nebulizzante pari a 2,30 m (**Figura 24**). Queste mostrano che con gli ugelli posti ad una altezza di 2,3 m, e in presenza di portate d'acqua più elevate, si può ottenere un significativo effetto di mitigazione anche con velocità del vento relativamente elevate (3 m/s, **Figura 24c e d**), con il vantaggio di una più ampia area raffrescata.

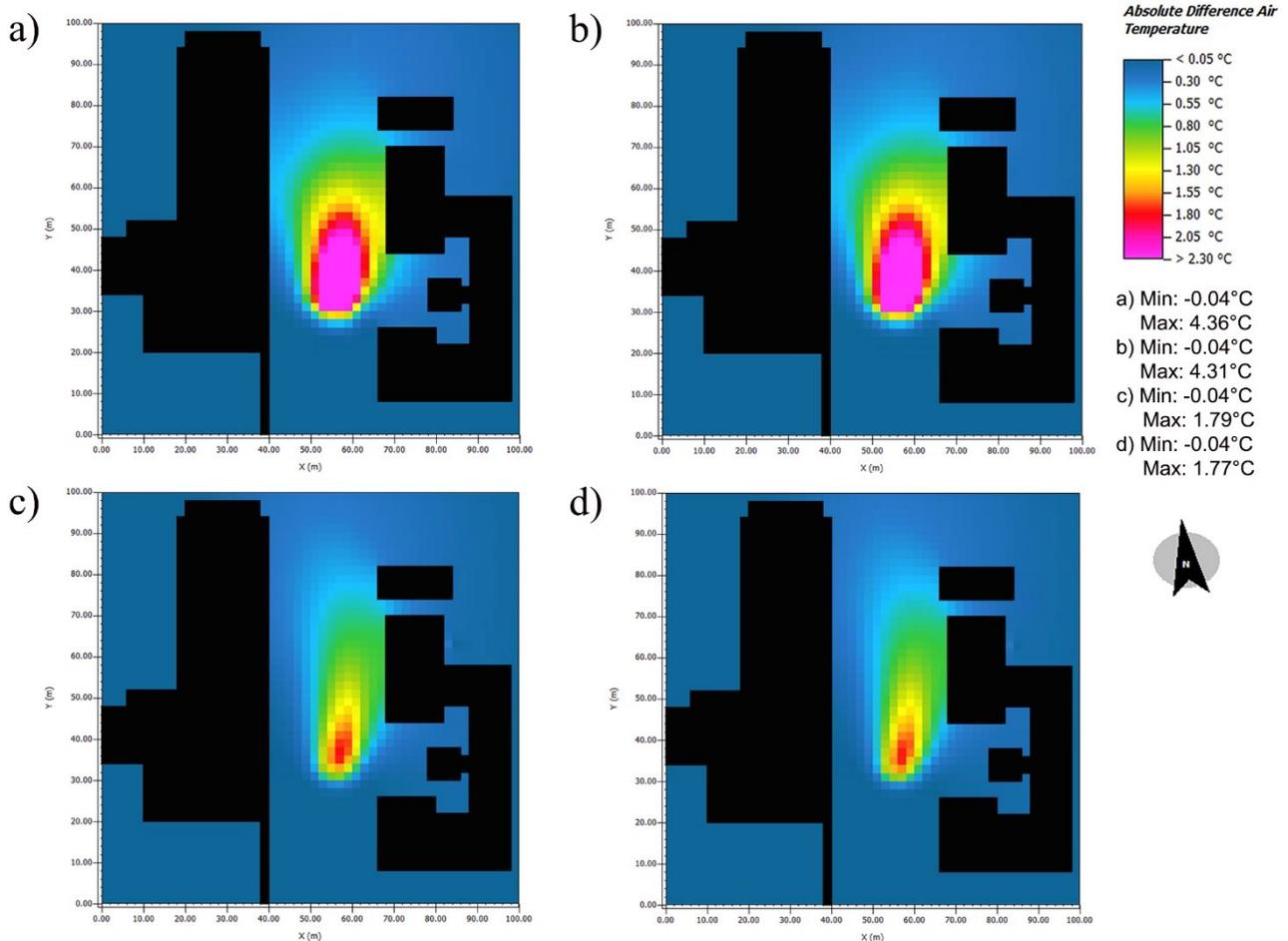


Figura 24. Differenza di temperatura indotta dalla presenza del sistema nebulizzante nell'area analizzata alle ore 14:00 con le seguenti condizioni: altezza degli ugelli di 2,30 m, doppia portata d'acqua rispetto al caso base (180 l/h), velocità del vento di 1 m/s all'altezza di 1,25 m (a) e di 1,75 m (b), velocità del vento di 3 m/s all'altezza di 1,25 m (c) e di 1,75 m (d)

Infine, la **Figura 25** rappresenta i profili verticali di T_a e ΔT_a registrati alle ore 14:00 nel punto di massima variazione di temperatura nel modello base rispetto a quello dei modelli con diversa altezza di nebulizzazione. Ancora una volta, il maggior effetto di raffreddamento si conferma per un'altezza degli ugelli di 2,3 m. In tutti i casi, il massimo effetto di mitigazione si registra nella cella del modello in cui sono stati inseriti gli ugelli, o immediatamente sotto, per poi decadere andando verso il suolo. L'effetto di raffreddamento viene mantenuto anche ad altezze più elevate.

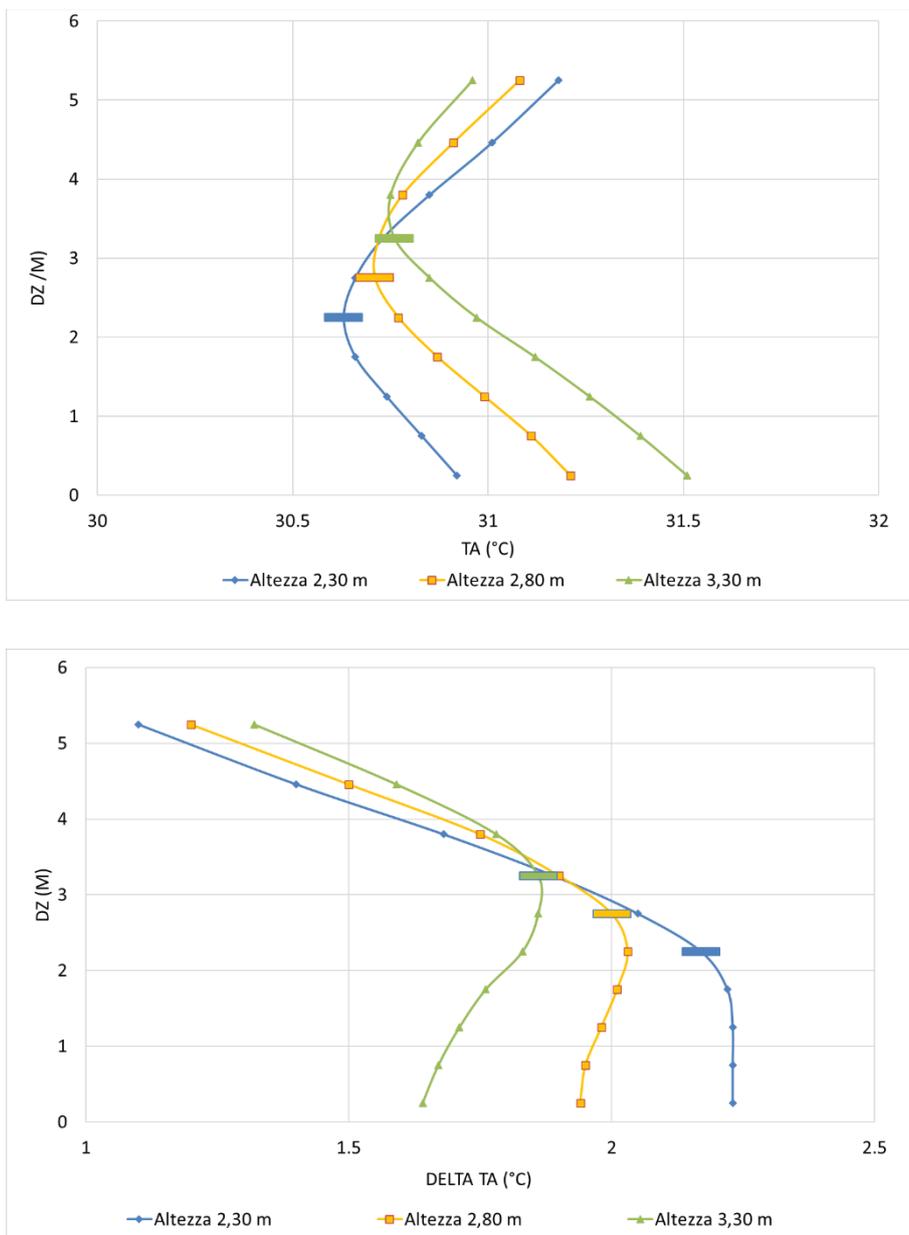


Figura 25. Profili verticali di T_a (alto) e ΔT_a (basso) registrati alle 14:00 nel lato nord-est dell'area nebulizzata, nel modello base (linea arancione) rispetto a quella dei modelli con altezza degli ugelli aumentata (linea verde) e diminuita (linea blu). Gli indicatori rettangolari rappresentano l'altezza degli ugelli lungo il profilo verticale

Per concludere, va tenuto conto che l'approccio di ENVI-met alla nebulizzazione, rispetto ad altri strumenti CFD, risulta piuttosto semplificato, in quanto basato su due presupposti di base: i) tutte le goccioline d'acqua hanno lo stesso diametro e ii) la quantità di goccioline in un dato volume d'aria cambia a causa dell'evaporazione, ma non la loro dimensione. Per superare i possibili limiti del modello dovuti a tali semplificazioni, è stata preliminarmente condotta una analisi di sensibilità sul diametro medio delle gocce. I risultati della validazione del modello sia in condizioni indisturbate che con nebulizzazione sono stati molto buoni per la temperatura (come evidenziato dagli elevati indici statistici di validazione) e più grossolani per l'umidità relativa (come rilevato da altri studi con ENVI-met). In particolare, il modello è risultato particolarmente performante nel cogliere l'andamento della temperatura nelle ore più calde della giornata, quando l'evaporazione delle particelle d'acqua, e dunque l'effetto raffrescante, è superiore. Le simulazioni condotte con il modello validato hanno permesso di definire l'estensione spaziale, oltre che l'entità, dell'azione di mitigazione nel contesto urbano locale. Si è osservato che gli sbalzi termici più significativi

(1,95 °C a 1,25 m di altezza) si sono verificati in prossimità, ma al di fuori dell'area nebulizzata, in relazione alla direzione del vento. Diminuzioni di temperatura (dell'ordine di 0,3-0,5 °C) si sono ottenute, sottovento, fino a circa 24 m di distanza dall'area. Simulazioni parametriche condotte col modello validato hanno permesso di approfondire il ruolo svolto dalla portata dell'acqua, dall'altezza degli ugelli nebulizzanti e dalla velocità del vento. Come previsto, la differenza di temperatura nello scenario nebulizzato rispetto al caso indisturbato aumenta con la densità degli ugelli e diminuisce con l'altezza di iniezione. Va infine sottolineato che attività simulative in contesti micro-urbani offrono interessanti applicazioni, quali: i) la possibilità di quantificare l'estensione spaziale dell'area raffrescata in diverse condizioni ambientali e quindi integrare i risultati sperimentali senza la necessità di estese reti di sensori; ii) la possibilità di determinare la sensibilità dell'azione di raffrescamento alle condizioni ambientali e a varianti progettuali tramite analisi parametrica; iii) la possibilità di derivare criteri progettuali da applicare sia a livello urbanistico che di sviluppo industriale.

2.3 Studio sperimentale

Lo studio sperimentale è stato concepito e condotto al fine di:

- raccogliere e verificare le varie considerazioni tecniche e tecnologiche inerenti all'installazione di un sistema di nebulizzazione (manutenzione dei componenti, sicurezza anti-legionella, specifiche di controllo, ...);
- progettare e conseguentemente realizzare un design flessibile, idoneo ad un'attività sperimentale orientata alla parametrizzazione ed all'ottimizzazione;
- organizzare ed armonizzare i sistemi di raffrescamento, di sicurezza e di gestione.

2.3.1 Metodologia

La sperimentazione ha avuto luogo in uno spazio aperto nei pressi del polo di Ingegneria dell'Università Politecnica delle Marche di Ancona (Figura 26 e Figura 27).

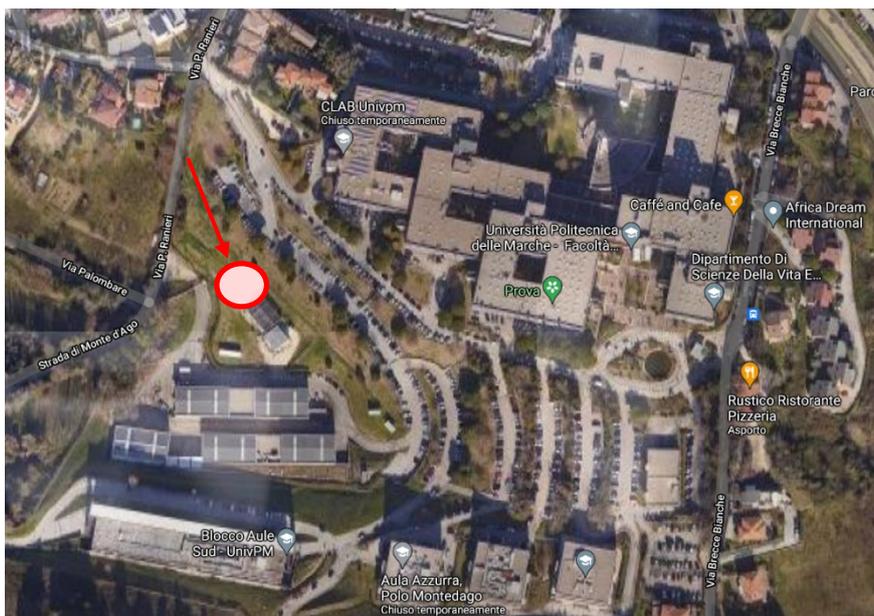


Figura 26. Immagine satellitare con indicazione del luogo adibito alla sperimentazione



Figura 27. Area adibita alla sperimentazione

La struttura per sostenere gli ugelli è stata realizzata con profili in alluminio e ancorata opportunamente con dei tiranti affinché fosse stabile e resistente al vento. La struttura occupa un'area di circa 24 m² e si alza fino a 3 m circa da terra (Figura 28). Alla struttura portante sono stati aggiunti 8 profili lunghi 2 m; questi sono stati installati in modo da poter essere spostati verticalmente permettendo di posizionare gli ugelli a diverse altezze (la sperimentazione ha previsto tre diverse altezze degli ugelli: 2,20 m, 2,60 m e 2,90 m).



Figura 28. Foto della struttura

Per il montaggio degli ugelli sono stati utilizzati 4 tubi, disposti longitudinalmente e supportati da 4 cavi in acciaio fissati ai profilati attraverso degli anelli inseriti nelle scanalature. Questo sistema consente di variare l'interasse delle tubazioni e ha permesso di valutare l'impianto in due situazioni: con interasse di 1,00 m e di 0,80 m. Nella struttura può inoltre essere installato un telo per la schermatura solare, che va posto nella parte superiore.

L'impianto di raffrescamento è costituito dalla pompa e dagli ugelli. È stata utilizzata una pompa Premium 70 Bar 3 l/min 230V 50Hz, con manometro e carter copri-motore, completa di valvola di ingresso e scarico linea con pressostato inverso per evitare il funzionamento a secco. Alla pompa è stato collegato un sistema filtrante 1x9" - 3/4" con cartucce in *melt-blown* da 5 micron completo di staffa, *nipples*, due tubi di carico e chiave di serraggio. Tra questi due elementi è stata posta una valvola di intercettazione a sfera. Dalla pompa parte una tubazione in poliammide da 1/4" che poi si dirama nelle quattro tubazioni sulle quali sono montati gli ugelli. Per realizzare la rete di tubazioni sono stati utilizzati dei raccordi per tubo da 1/4" di due tipi: 3 a "T" e 4 a "L". Per ogni tubo sono stati montati 6 ugelli, per un totale di 24 ugelli inox da 0,20 mm 10/24" con corpo in ottone nichelato pulibile e con sistema antigoccia.

Per ridurre i consumi di energia elettrica e rendere l'impianto quanto più possibile indipendente dalla rete elettrica, è stato installato un impianto fotovoltaico. In questo modo, quando l'energia messa a disposizione dall'impianto stesso era sufficiente per alimentare il sistema, l'unico consumo risultava quello idrico. Sono stati installati 4 pannelli fotovoltaici con celle in silicio monocristallino di tipo PERC (DXM6-60P/BF, Sun-Earth), aventi ciascuno una potenza nominale valutata in condizioni STC di 300 W_e ed una superficie captante di circa 1,63 m². I pannelli sono stati orientati a Sud e inclinati di 20° per massimizzare la produzione nella stagione estiva. L'inverter, modello EDISON3024, è di tipo ad onda pura con regolatore di carica PWM integrato ad alta frequenza e può essere usato solo per impianti fotovoltaici *stand-alone* (non è possibile immettere in rete l'eventuale sovrapproduzione di energia elettrica). Nel setup sperimentale, l'inverter è stato usato per alimentare la pompa prelevando energia dai pannelli fotovoltaici e convertendo la corrente da continua ad alternata. Quando l'energia prodotta dai pannelli non risultava sufficiente, la quota rimanente veniva prelevata dall'inverter da un accumulo elettrico (costituito da 4 batterie di tipo AGM – *deep cycle*, con capacità nominale totale di 7200 Wh); se nemmeno l'accumulo elettrico era in grado di fornire l'energia necessaria, l'inverter alimentava la pompa prelevando energia direttamente dalla rete elettrica.

Per valutare l'impianto e la sua efficienza sono stati installati numerosi sensori, sia all'esterno che all'interno della struttura con l'impianto di raffrescamento. Sono dunque stati analizzati i dati ottenuti monitorando tutta l'area sperimentale e tenendo conto di tutte le variabili che potevano influenzare il funzionamento e la prestazione del raffrescamento. Per quanto riguarda le caratteristiche dell'ambiente naturale non raffrescato, le variabili ambientali sono state monitorate da una centralina meteo posizionata poco distante dalla struttura sperimentale (Figura 29). La centralina ha permesso di misurare:

- umidità relativa e temperatura dell'aria attraverso un sensore termoigrometrico (DMA 572.1, con Pt100 e sensore capacitivo, campo di misura -30 ÷ 70 °C (temperatura) e 0 ÷ 100 % (umidità relativa), accuratezza ±0,2 °C per la temperatura, 1,5% per l'umidità (5 ÷ 95%, 23 °C), tempo di risposta 10 s, uscita 0 ÷ 1 V);
- radiazione solare globale orizzontale attraverso un piranometro (DPA 153, di prima classe, con range spettrale di 285-2800 nm, range di misura di 0-2000 W/m², incertezza inferiore al 5%, tempo di risposta inferiore a 30 s);
- direzione e velocità del vento con un tacogonioanemometro a coppette (DNA 022, con campo di misura 0-60 m/s per la velocità del vento e 0-360° per la direzione, corrispondenti accuratezze del 1,5% e 1% sul valore letto e costanti di tempo di 2,5 s e 0,74 s).



Figura 29. Centralina meteo

All'interno della struttura sperimentale, invece, sono stati posizionati rilevatori di temperatura, umidità relativa e temperatura media radiante. I dati relativi alla temperatura e all'umidità relativa sono stati raccolti da 4 sensori PCMINI52 della Michell Instruments, montati su un'asta di supporto che permetteva di variarne l'altezza da terra (mantenuta fissa a 1,10 m). I sensori sono stati schermati, al fine di ridurre l'influenza della radiazione solare. Si riportano di seguito le specifiche dei sensori PCMINI52:

- range di misura 0–100% per l'umidità relativa e -20 - +80 °C per la temperatura;
- accuratezza $<\pm 2\%$ (10–90%) per l'umidità relativa e ± 0.2 °C per la temperatura;
- tempo di risposta <10 s;
- segnale in uscita 0 - 10 V;
- tensione di alimentazione 14 - 35 V.

Per misurare la temperatura media radiante sono stati disposti due globotermometri funzionanti con due termoresistenze Pt100. Anche questi dispositivi sono installati su un supporto, con altezza fissa a 1,80 m da terra. Inoltre, al fine di realizzare una mappa della temperatura nell'area interessata al raffrescamento, sono state installate 10 termocoppie di tipo T inserite su un supporto a forma di croce e posizionate sotto un ugello, tra i due globotermometri (Figura 30).

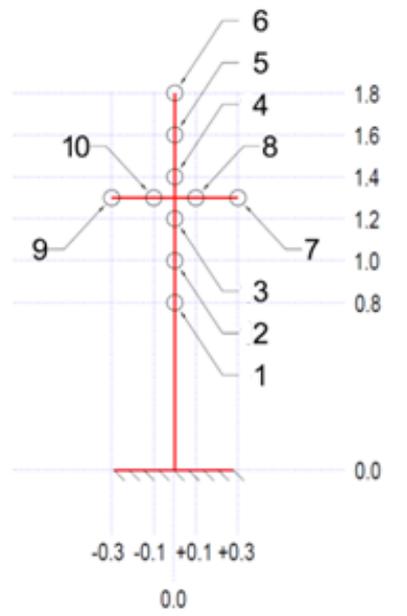


Figura 30. Termocoppie installate sul supporto a croce

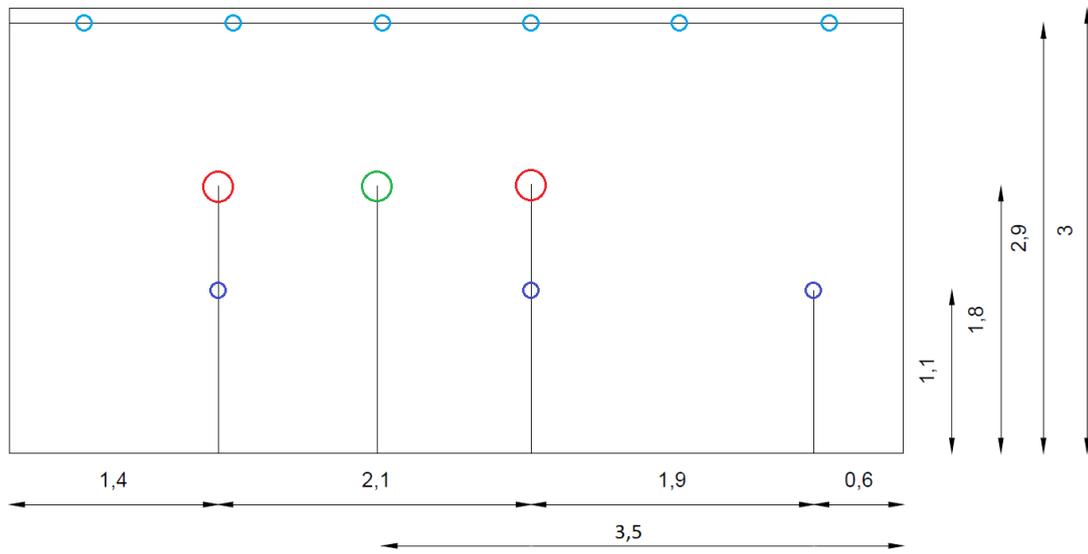
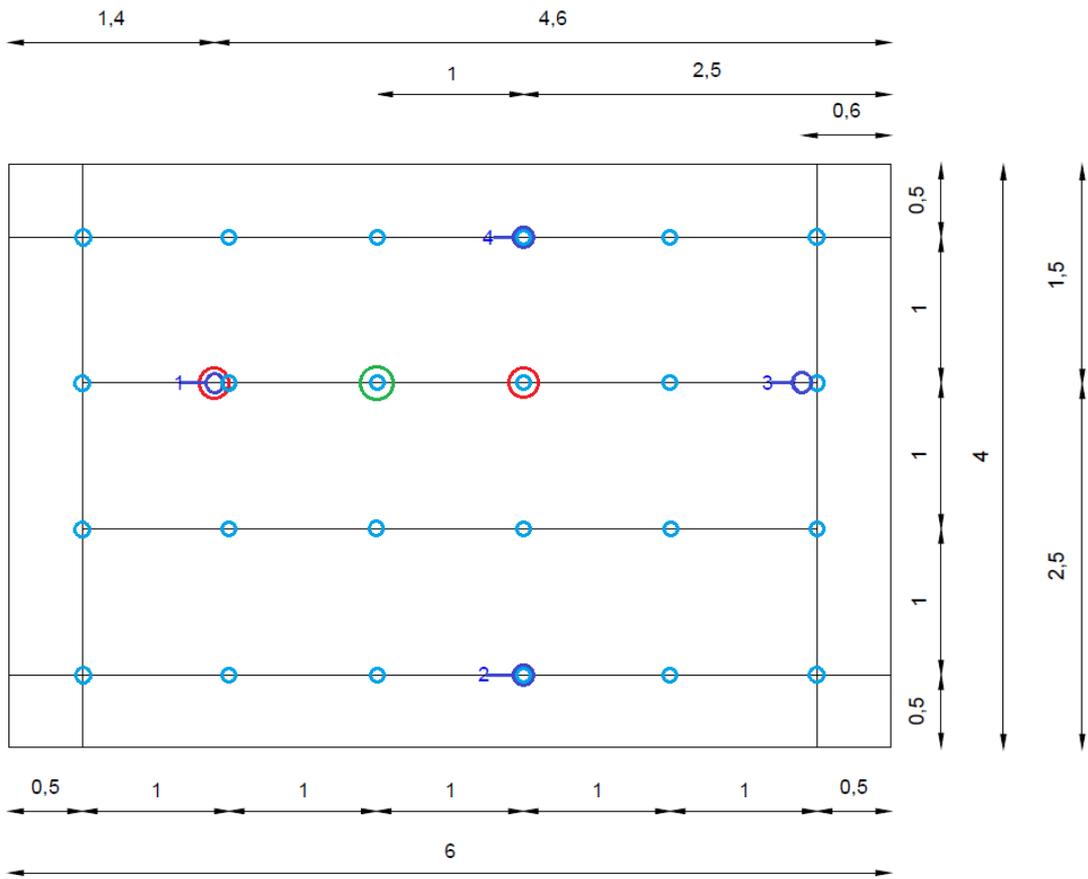
L'impianto, inoltre, è stato dotato anche di altri sensori collegati alla pompa:

- un sensore di pioggia che, se bagnato, entra in azione bloccando la pompa e di conseguenza interrompendo il raffreddamento;
- un flussimetro, necessario per la misurazione della portata istantanea e dei litri consumati;
- un contatore di energia elettrica, che permette di misurare la quantità di energia elettrica assorbita dalla pompa stessa.

L'acquisizione dei dati di produzione e il controllo dell'impianto fotovoltaico sono stati gestiti attraverso il software dedicato WatchPower, in grado di interagire col sistema attraverso l'inverter. Tutte le rimanenti misure, nonché il controllo dell'impianto di raffreddamento, sono stati invece gestiti attraverso il software LabVIEW della National Instruments.

Per sorvegliare da remoto l'area sperimentale, sono state installate due telecamere. Accanto alla struttura è stata inoltre posizionata una casetta nella quale sono stati riposti: PC, inverter, batterie, quadri elettrici e schede dei sensori.

La Figura 31 riporta la pianta e la sezione della struttura, e mostra il posizionamento di ugelli e sensori. Lo schema logico dell'impianto è infine rappresentato in Figura 32.



Legenda	
	Ugello inox 0,2 mm, 10/24" con corpo in ottone nichelato pulibile e sistema antigoccia (x24)
	Sensore di umidità relativa e temperatura miniaturizzato della Michell Instruments: PCMINI52 (x4)
	Globotermometro contenente una termoresistenza (x2)
	Termocoppie di tipo T (x 10) su supporto

Figura 31. Pianta e sezione che mostrano la posizione di ugelli e sensori

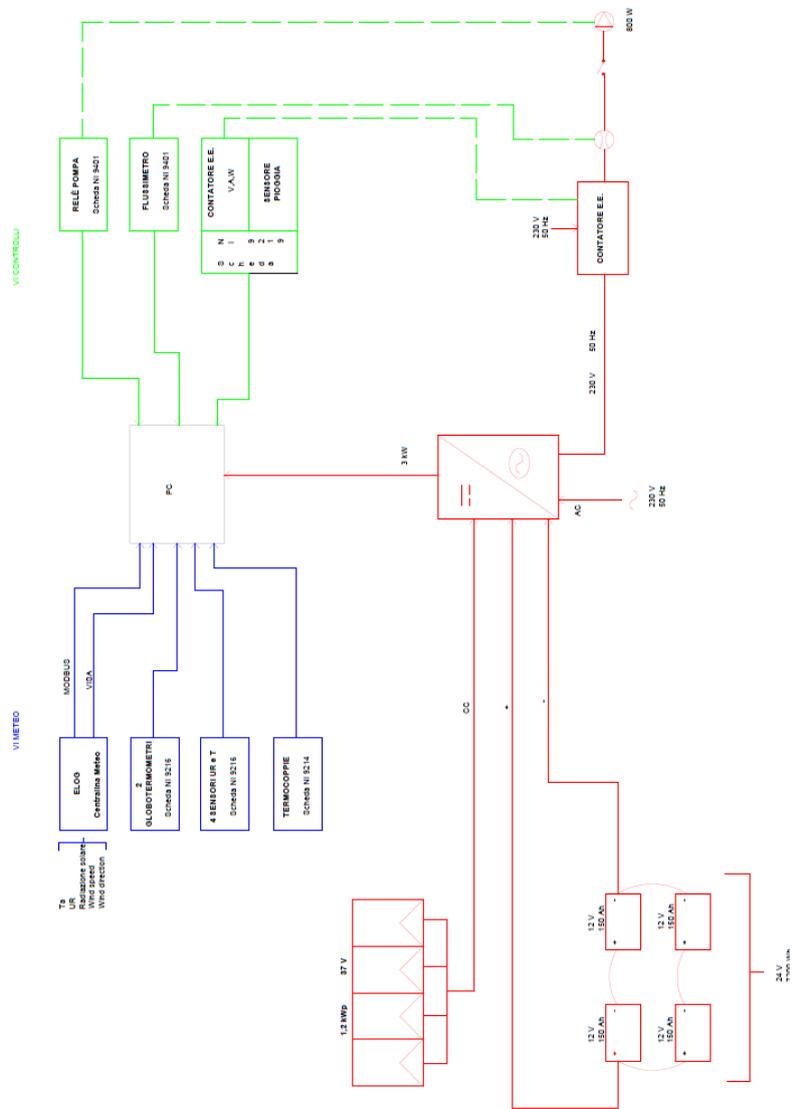


Figura 32. Schema logico dell'impianto

La campagna sperimentale è stata avviata nella seconda metà del mese di giugno 2021 ed è proseguita fino al mese di agosto dello stesso anno. I dati misurati dai sensori sia interni che esterni alla struttura sperimentale sono stati acquisiti tramite il software LabVIEW e salvati in fogli di calcolo dedicati.

L'impianto di raffrescamento è stato testato variando 4 parametri progettuali e/o di funzionamento, che influenzano in modo diretto o indiretto le prestazioni del sistema:

- 1) Altezza degli ugelli rispetto al suolo (2,20, 2,60 o 2,90 m dal suolo).
- 2) Interasse degli ugelli (1,00 o 0,80 m).
- 3) Presenza o meno del telo superiore per la schermatura dalla radiazione solare.
- 4) Controllo della pompa, di tipo manuale o temporizzato. Nel primo caso, la pompa è avviata alle ore 09:00 e tenuta accesa fino alle ore 19:00. Nel secondo caso, la pompa resta accesa per 20 secondi e poi rimane spenta per 20 secondi, in modo ciclico dalle 09:00 alle 19:00. In quest'ultima condizione, se la temperatura dell'aria esterna è inferiore a 26 °C, la pompa viene spenta automaticamente.

La variazione di uno o più dei 4 parametri ha dato luogo a differenti configurazioni di prova dell'impianto. La prestazione del sistema di raffrescamento è stata calcolata in base alla differenza di temperatura tra la media delle temperature rilevate dai 4 sensori interni (T_{sp}) e l'aria esterna non trattata (T_{amb}):

$$\varepsilon_T = \frac{T_{sp} - T_{amb}}{T_{amb}} = \frac{\Delta T}{T_{amb}}$$

In modo analogo, si è anche valutata la variazione di umidità relativa tra ambiente controllato (RH_{sp}) e non controllato (RH_{amb}):

$$\varepsilon_{RH} = \frac{RH_{sp} - RH_{amb}}{RH_{amb}} = \frac{\Delta RH}{RH_{amb}}$$

Le variazioni di temperatura e umidità relativa sono state quindi confrontate tra le varie configurazioni di prova, al fine di identificare la configurazione più idonea per il sistema di raffrescamento. Le configurazioni complessivamente analizzate sono 5, ed un loro riepilogo è riportato in Tabella 11.

Tabella 11. Sintesi delle configurazioni

Nome configurazione	Giorni di validità	Altezza ugelli	Interasse ugelli	Telo superiore	Controllore	ΔT_{max}	ΔRH_{max}
Configurazione 1	06-07 luglio	2,60 m	1,00 m	false	temporizzato	1,5 °C	8%
Configurazione 2	08-09 luglio	2,60 m	1,00 m	false	manuale	3 °C	15%
Configurazione 3	11-15 luglio	2,60 m	1,00 m	true	manuale	3 °C	13%
Configurazione 4	21-23 luglio	2,20 m	1,00 m	true	manuale	4 °C	19%
Configurazione 5	30 luglio; 01-05 agosto; 10-11 agosto	2,60 m	0,80 m	true	manuale	3 °C	23%

La sperimentazione ha anche previsto la redazione di questionari, in forma anonima, di valutazione del comfort termoigrometrico da parte di persone a cui è stato richiesto di sostare per un certo tempo all'interno della struttura del sistema di raffrescamento e in ambiente naturale indisturbato. Sulla base anche di quanto riportato nella letteratura scientifica sul tema, si è deciso di effettuare la sperimentazione con individui in condizioni di ombreggiamento. Per questo motivo, la prestazione del sistema di raffrescamento è stata valutata in presenza della schermatura solare e nell'ambiente naturale è stata predisposta l'installazione di un gazebo. Durante il test i soggetti restavano seduti, simulando la permanenza in un ristorante. Ciò giustifica, per l'ambiente controllato, la scelta della configurazione 4, che come indicato in Tabella 11 prevede gli ugelli posti a 2,20 m di distanza dal terreno, lasciando come spazio tra la testa degli occupanti e gli ugelli 0,90 m circa, come nel lavoro di Zhang et al. [45].

Relativamente alla struttura del questionario, la prima parte di esso è stata stilata seguendo le indicazioni del lavoro di Ulpiani et al. [46], e quindi chiedendo informazioni riguardo: genere, stato di gravidanza, altezza, peso, età, stato di salute, attività svolta fino a mezz'ora prima del test, abbigliamento e tempo speso all'aria aperta.

La seconda parte del questionario veniva proposta durante il periodo di soggiorno in ambiente naturale, ed i soggetti dovevano rispondere a 4 domande relative a: sensazione termica percepita (TSV), sensazione di sudore, sensazione di umidità e sensazione di comfort (CSV). Il TSV e il CSV sono stati valutati con la scala a 7 punti della norma ASHRAE 55-1992 [47], che come noto varia da -3 a +3. La sensazione relativa al sudore è stata valutata con una scala a 4 punti, da -3 a 0. La sensazione di umidità è stata valutata così come riportato nell'articolo di Zhang et al. [45], a cui è stato aggiunto un ulteriore punto per tenere conto di un eventuale "effetto bagnato"; essa presenta una scala di valutazione a 5 punti (da -4 a 0).

Dopo il test in ambiente indisturbato, gli utenti venivano invitati a spostarsi all'interno della struttura del sistema di raffrescamento, dove veniva loro richiesto di compilare lo stesso questionario ma con l'aggiunta di una valutazione globale della soddisfazione del sistema (con scala a 5 punti, da "-2, non soddisfacente" a "+2, soddisfacente").

Infine, sono state inserite due domande puntuali sulle sensazioni termica e di percezione dell'umidità all'effettivo contatto tra particelle e pelle, ed è stato lasciato uno spazio per un commento personale (Figura 33).

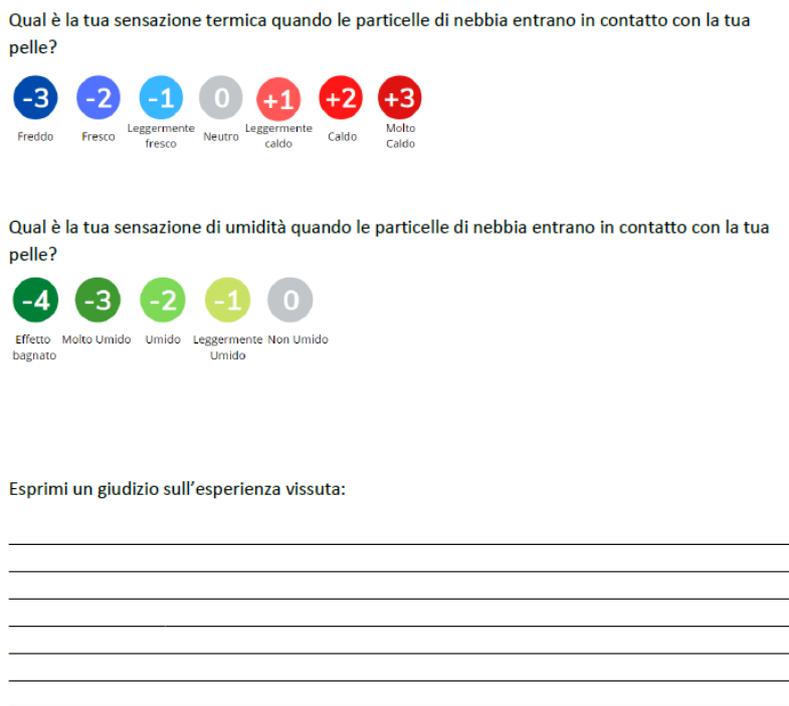


Figura 33. Quarta parte del questionario

Completata la raccolta dei sondaggi, che è durata tre giorni e ha visto la partecipazione di 53 persone, si sono analizzati e confrontati i voti relativi all'ambiente naturale e all'ambiente raffrescato.

2.3.2 Risultati

La variazione percentuale (in valore assoluto) della differenza di temperatura tra ambiente controllato e ambiente esterno è riportata, per ciascuna configurazione, in Figura 34. Il grafico tiene conto di tutti i dati con temperatura dell'aria ambiente compresa tra 28 e 32 °C, e velocità del vento inferiore a 3 m/s; sono stati imposti tali limiti in quanto il sistema di raffrescamento è risultato più efficiente in queste condizioni. Osservando la Figura 34, si nota come la soluzione più soddisfacente per l'effetto di raffrescamento sia la configurazione 4, con un valore mediano (linea rossa) che arriva al 9%. Le configurazioni 1, 2, 3 e 5 sono tutte al di sotto del 5%. La configurazione 4 prevede il telo di schermatura per la radiazione solare e gli ugelli posti ad un'altezza di 2,20 m dal suolo; la medesima configurazione sarà poi adottata per la valutazione del comfort attraverso i questionari. La dispersione dei punti è funzione del grande numero di dati considerati, che non è lo stesso per ciascuna configurazione, in quanto alcune sono state valutate per più giorni.

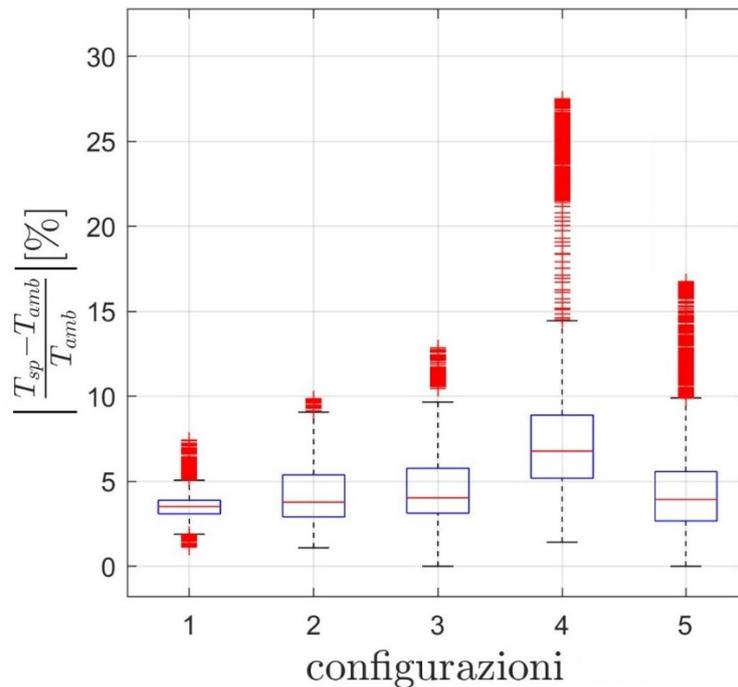


Figura 34. Box plot del valore assoluto della variazione percentuale di temperatura per le configurazioni analizzate

In Figura 35, la variazione percentuale è calcolata in termini di umidità relativa. Si nota come la configurazione 4 sia quella in cui nel sistema di raffreddamento viene prodotto più vapore. Si tratta sempre della configurazione con telo di schermatura per la radiazione solare ed ugelli ad altezza 2,20 m che, benché in grado di garantire migliori prestazioni sotto il profilo termico, hanno come difetto proprio una maggior produzione di umidità relativa nella zona di valutazione.

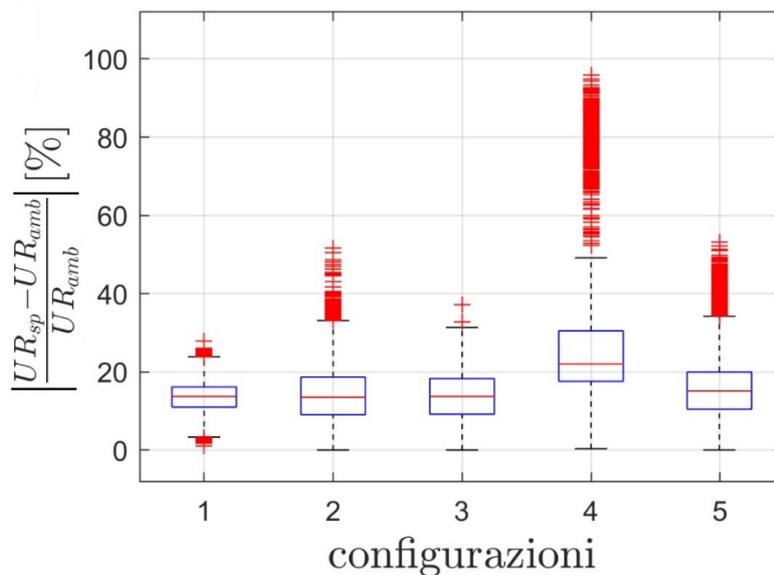


Figura 35. Box plot del valore assoluto della variazione percentuale di umidità relativa per le configurazioni analizzate

Le 5 configurazioni sono inoltre state confrontate a due a due, facendo variare in ogni caso un solo parametro progettuale, così come riportato di seguito:

- a) configurazione 1 vs configurazione 2, in cui varia il tipo di controllore;
- b) configurazione 3 vs configurazione 4, in cui varia l'altezza degli ugelli (in entrambe le configurazioni è presente il telo superiore per la schermatura solare);
- c) configurazione 3 vs configurazione 5, in cui varia l'interasse degli ugelli.

Nel caso a), tenuto conto delle sole giornate più calde, la Figura 36 mostra la distribuzione del ΔT in funzione della temperatura ambiente esterna. Si vede come la temperatura all'interno del sistema di raffrescamento diminuisca al crescere della temperatura esterna e come con il controllore manuale (grafico a destra) si raggiungano temperature più basse. Relativamente alla variazione di umidità relativa ΔRH (Figura 37), essa presenta un trend crescente con la temperatura esterna, specialmente nel caso di controllore manuale, che vede un maggiore aumento dell'umidità con dei picchi che arrivano fino al 15%. Nel caso di controllore temporizzato, invece, non si supera mai il 10%.

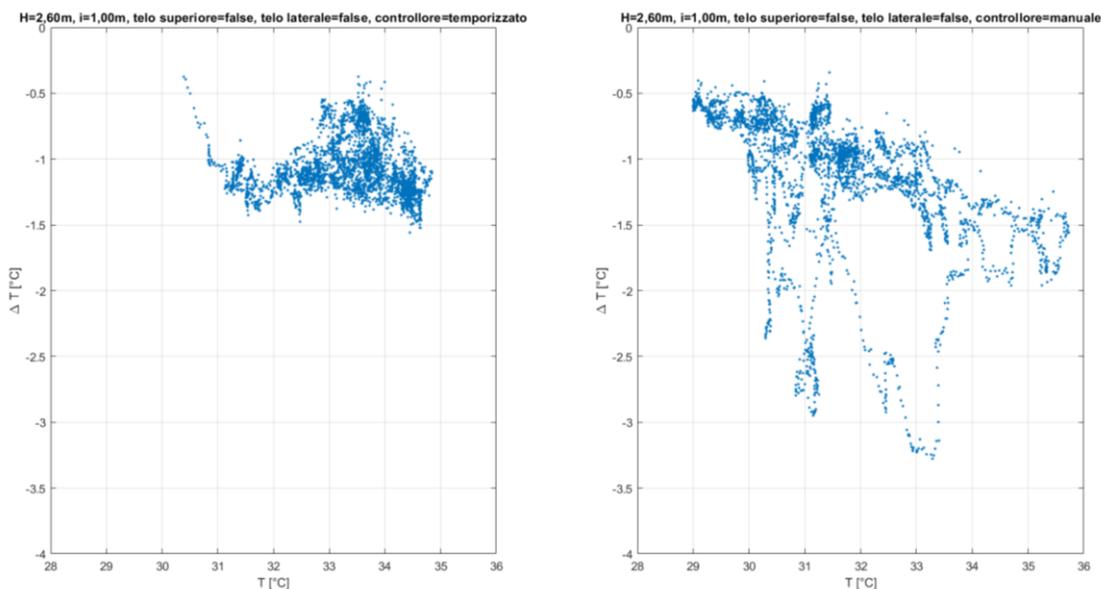


Figura 36. Grafici a dispersione $\Delta T-T_a$ per il caso a) (controllore variabile)

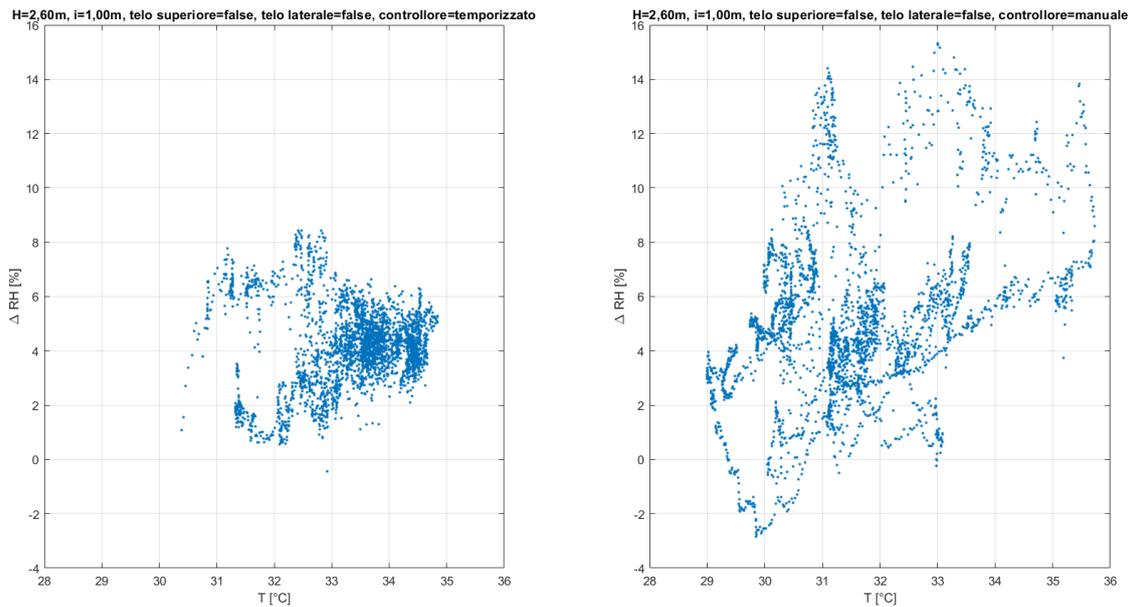


Figura 37. Grafici a dispersione $\Delta RH-T_a$ per il caso a) (controllore variabile)

Nel caso b), in Figura 38 si nota, come atteso, che l'abbassamento degli ugelli porta a dei ΔT maggiori, per esempio a 30 °C con gli ugelli a 2,60 m (grafico a sinistra) il ΔT è per lo più compreso tra -1,5 e -2 °C, mentre con l'altezza degli ugelli pari a 2,20 m (grafico a destra) la variazione di temperatura è compresa principalmente tra -2,5 e -3 °C. In generale, il ΔT cresce all'aumentare della temperatura esterna. Anche per l'umidità relativa (Figura 39) si verifica quanto atteso, ovvero che con gli ugelli posti ad un'altezza inferiore si ha un incremento maggiore della stessa. A 30 °C, la configurazione con gli ugelli a 2,20 m dal suolo (grafico a destra) vede valori di ΔRH sul 15%, mentre la configurazione con gli ugelli a 2,60 m (grafico a sinistra) alla stessa temperatura ambiente presenta valori compresi tra il 6 e l'8%. Anche la variazione di umidità, così come quella di temperatura, cresce all'aumentare della temperatura dell'aria esterna.

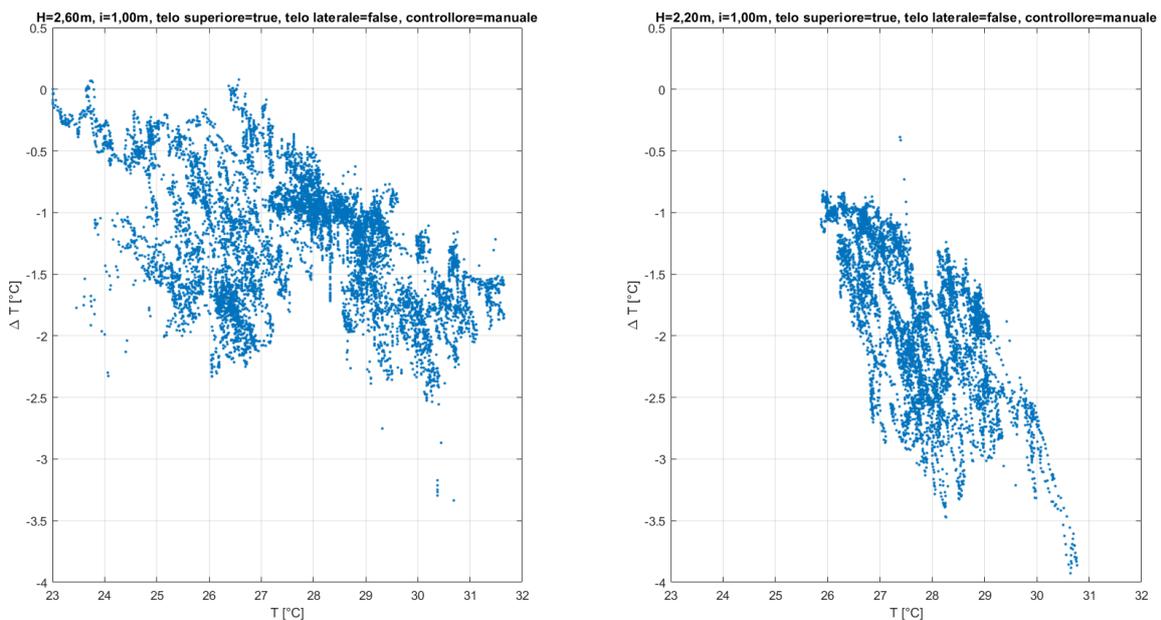


Figura 38. Grafici a dispersione $\Delta T-T_a$ per il caso b) (altezza ugelli variabile)

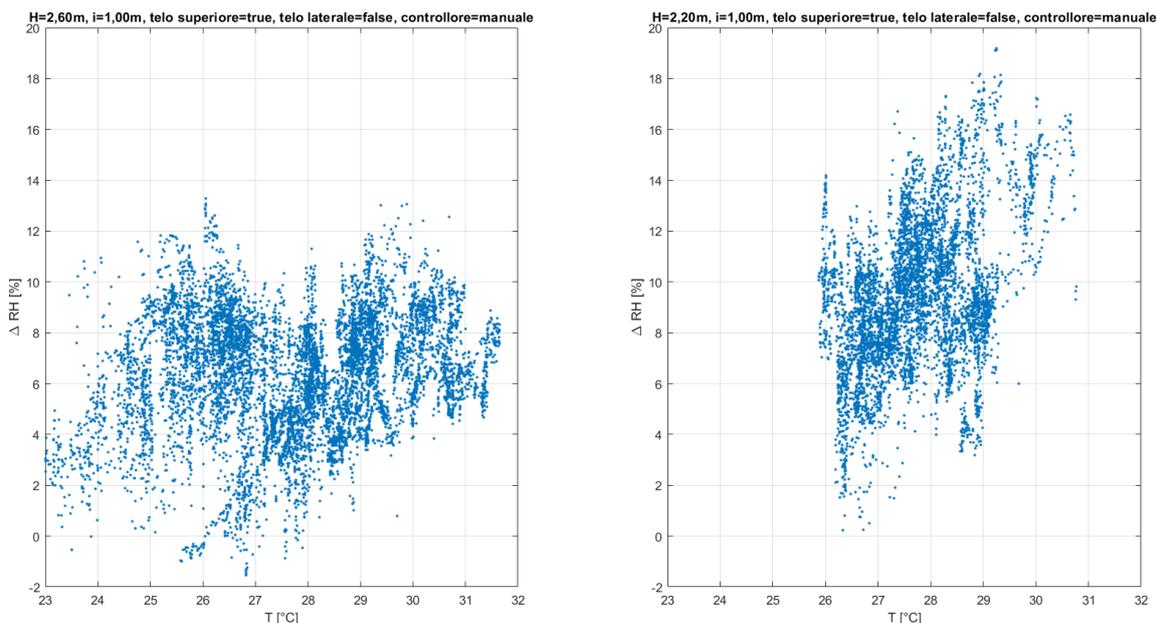


Figura 39. Grafici a dispersione $\Delta RH-T_a$ per il caso b) (altezza ugelli variabile)

Nel caso c), in cui l'unico parametro a variare è l'interasse degli ugelli, non si notano differenze significative tra la configurazione con interasse 1,00 m (Figura 40, grafico a sinistra) e quella con interasse 0,80 m (Figura 41, grafico a destra): la nuvola di punti è infatti localizzata indicativamente nella stessa zona dei due grafici. I valori di ΔT sono principalmente compresi tra 0 e -2 °C. Anche per quanto riguarda ΔRH le nuvole di punti sono posizionate nelle stesse aree dei due grafici (Figura 41). Il range più occupato dai dati è quello compreso tra 0 e 10%. Nella configurazione con interasse 0,80 m (grafico a destra), si può notare come il massimo incremento di RH sia raggiunto per temperature dell'aria esterna pari a 29-30 °C, dove si sfiora il 25% in più di umidità relativa.

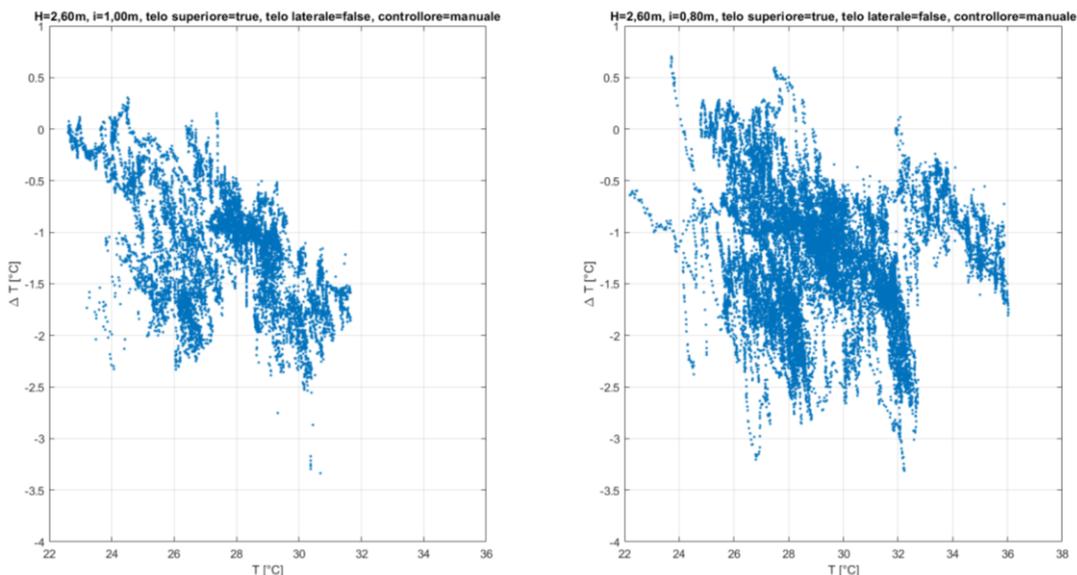


Figura 40. Grafici a dispersione $\Delta T-T_a$ per il caso e) (interasse ugelli variabile)

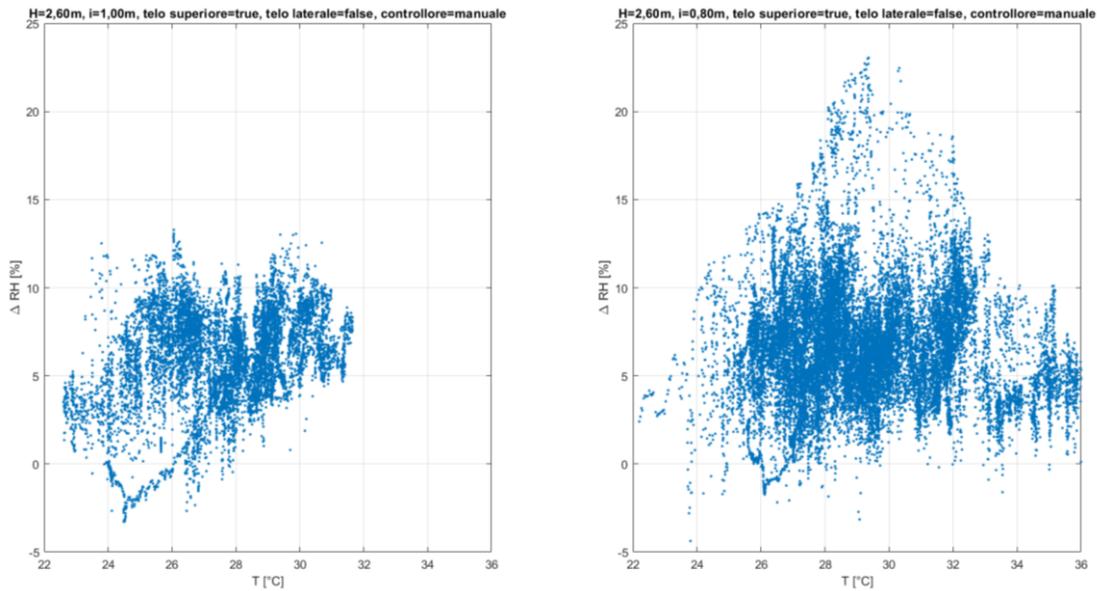


Figura 41. Grafici a dispersione $\Delta RH-T_a$ per il caso e) (interesse ugelli variabile)

Passando adesso ad analizzare i risultati ottenuti con i sondaggi relativi alla sensazione di comfort termoisometrico percepito dai soggetti, il campione analizzato è risultato formato da 53 individui, di cui 30 maschi (57%) e 23 femmine (43%).

La Figura 42 riporta i risultati dei voti espressi per la sensazione termica, ovvero il TSV (*Thermal Sensation Vote*), sotto forma di *box plot* "a violino". Da questo primo grafico, il sistema di raffreddamento risulta efficiente in termini di comfort termoisometrico, in quanto si passa da una sensazione di calore ad una di fresco. Il *box plot* delle risposte date in ambiente naturale è tutto spostato verso i valori positivi, e arriva alla sensazione di "+3, molto caldo". Il *box plot* della zona raffreddata è invece spostato verso i valori negativi: la scatola (linea verticale grigia) oscilla tra "-1, leggermente fresco" (valore mediano) e "-2, fresco", ma i baffi arrivano anche a "-3, freddo". Valutando il comfort si dovrebbe pensare che per dichiarare efficiente il sistema, le risposte dei questionari sotto la zona raffreddata dovevano essere intorno al valore "0, neutro"; tuttavia, essendo gli individui sottoposti al test in giornate estive molto calde, essi percepiscono il fresco come una situazione confortevole.

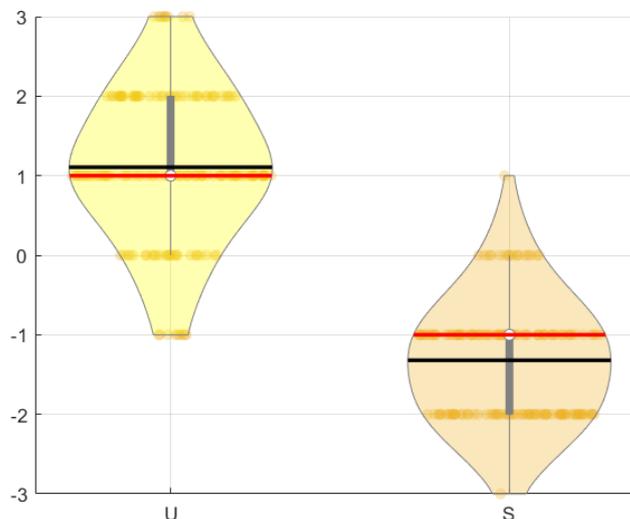


Figura 42. Box plot della sensazione termica TVS (U: ambiente indisturbato; S: ambiente raffreddato)

La seconda domanda del questionario chiedeva ai soggetti se durante il test essi stavano sudando. Dalla Figura 43 è chiaro come la sensazione di sudore sia stata maggiormente percepita in ambiente naturale, dove la mediana (linea rossa) dei voti si posa su “-1, leggermente”. Alcuni utenti, di minor numero rispetto a coloro che hanno dato voti 0 e -1, hanno scritto che stanno sudando “-2, abbastanza”. Sotto lo spray invece il grafico è tutto concentrato sul “0, no”; dunque, risulta che gli utenti sotto il sistema di raffreddamento non abbiano sudato, se non 3 soggetti che hanno espresso una leggera sensazione di sudore.

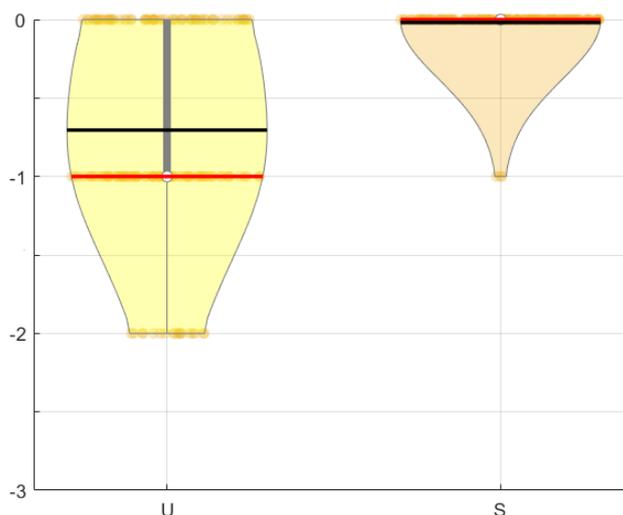


Figura 43. Box plot della sensazione di sudore (U: ambiente indisturbato; S: ambiente raffrescato)

La valutazione relativa alla sensazione di umidità prevedeva cinque possibilità di risposta, in una scala che progrediva da “0, non umido” a “-4, effetto bagnato”. Dalla Figura 44 è possibile notare che il valore mediano (linea rossa) si trovi in linea del voto “-1, leggermente umido” sia per quanto riguarda l’ambiente naturale che l’ambiente raffrescato. La sensazione di umidità, come ci mostra il grafico, aumenta con il sistema spray, che vede alcuni soggetti esporre anche il giudizio di “-4, effetto bagnato”. Il violino a destra si allarga maggiormente rispetto a sinistra anche nei voti -2 e -3.

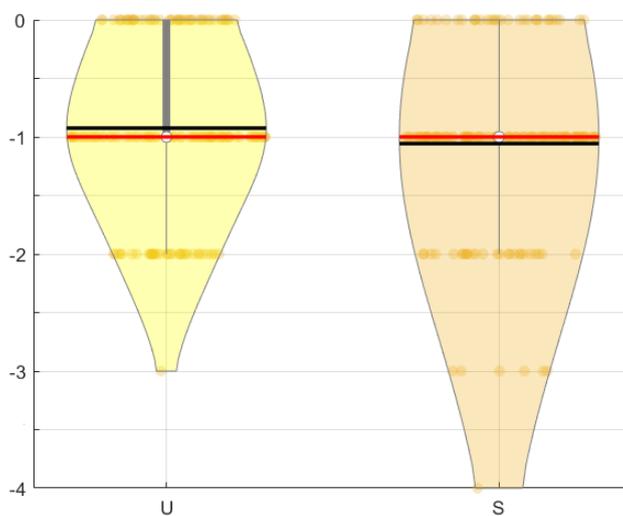


Figura 44. Box plot della sensazione di umidità (U: ambiente indisturbato; S: ambiente raffrescato)

In termini di sensazione di comfort CSV, dalla Figura 45 si può notare come l'ambiente raffrescato sia risultato più confortevole rispetto all'ambiente naturale. È necessario riprendere la considerazione precedente secondo cui la sensazione di "fresco" sia stata considerata come una condizione di comfort, e questo grafico lo conferma, in quanto il violino relativo alla zona raffrescata è quasi tutto in corrispondenza di voti confortevoli. Il valore mediano passa da "-1, leggermente sgradevole" in ambiente naturale a "+2, confortevole" sotto il sistema di raffrescamento evaporativo. Sotto il gazebo esterno ci sono stati anche voti "-2, sgradevoli", mentre la sensazione sotto la zona raffrescata per alcuni soggetti è "+3, molto confortevole".

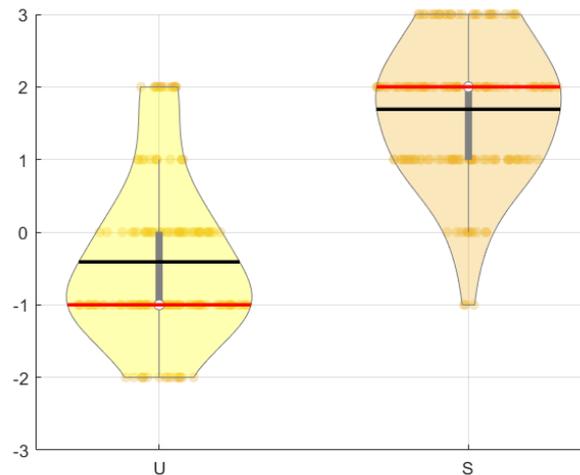


Figura 45. Box plot della sensazione di comfort CSV (U: ambiente indisturbato; S: ambiente raffrescato)

Durante il soggiorno al di sotto del sistema di raffrescamento, ai soggetti è stato chiesto se nel complesso il sistema fosse risultato essere soddisfacente. Un solo soggetto ha espresso un giudizio "-2, non soddisfacente" nei confronti del sistema, mentre salendo verso l'alto nel grafico riportato in Figura 46 si nota come il violino si allarghi progressivamente fino a "+1, abbastanza soddisfacente", che risulta essere il voto maggiormente espresso, nonché il valore mediano. La media (linea nera) è poco sopra il voto +1, questo perché gran parte dei soggetti hanno conferito la massima soddisfazione al sistema. La scatola del *box plot* (linea grigia verticale spessa), infatti, è compresa proprio tra "+1, abbastanza soddisfacente" e "+2, soddisfacente", mentre i baffi (linea grigia verticale sottile) si estendono fino a "0, neutro", lasciando i voti più negativi come *outliers*.

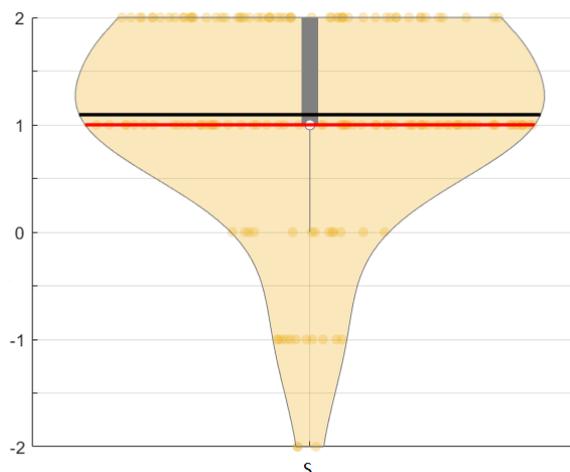


Figura 46. Box plot della soddisfazione globale del sistema di raffreddamento (S: ambiente raffrescato)

Un'altra parte del questionario è stata dedicata alla sensazione percepita dai soggetti nel momento in cui le particelle di acqua nebulizzata prodotte dal sistema di raffreddamento entrano in contatto con la pelle. Le domande sono riproposte nella stessa formulazione delle precedenti e interessano la sensazione termica e di umidità. Non sono state suddivise nel tempo perché si tratta di domande puntuali sull'effettivo momento di contatto tra gocce e pelle. Analizzando i voti delle sensazioni percepite al contatto delle particelle di acqua nebulizzata con la pelle (Figura 47), si nota che per quanto riguarda la sensazione termica TSV il contatto produce effetti che variano tra "0, neutro" e "-3, freddo", mentre il grafico relativo all'umidità (Figura 48) è occupato nella sua interezza, poiché i voti sono più dispersi. La media dei voti relativa al TSV cade tra "-2, fresco" e "-1, leggermente fresco". La mediana dei voti della percezione dell'umidità cade su "-1, leggermente umido", anche se tutti i voti di comfort sono stati opzionati almeno da un soggetto. Il voto "-4, effetto bagnato" è quello che ha ricevuto meno preferenze e questo è un aspetto positivo, in quanto dimostra come nonostante l'immissione di particelle di acqua nebulizzata, l'umidità non crei un effetto troppo sgradevole per gli utenti.

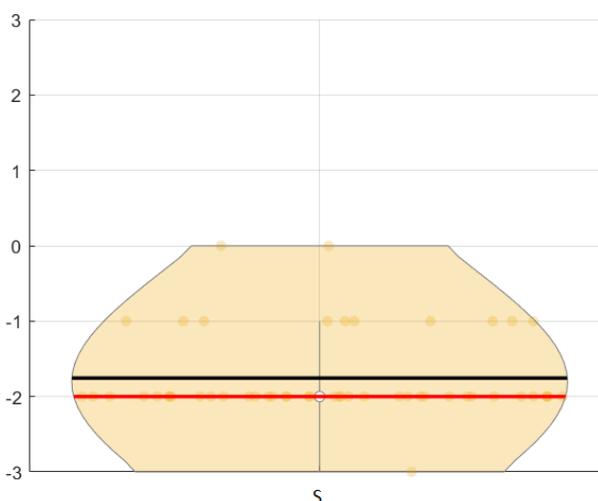


Figura 47. Box plot relativo alla sensazione termica al contatto pelle-gocce

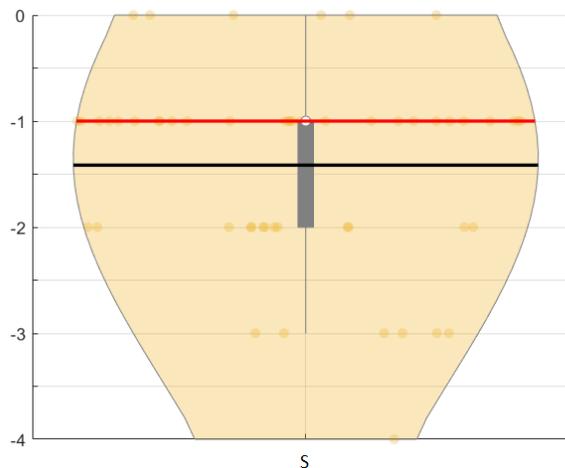


Figura 48. Box plot relativo alla sensazione di unidità al contatto pelle-gocce

Si danno infine alcune valutazioni relative alla possibilità di autonomia energetica da parte del sistema di raffrescamento. Sebbene per via di alcune mancate acquisizioni da parte del software dedicato WatchPower non sia stato possibile monitorare l'impianto fotovoltaico per tutta la durata della sperimentazione, in Figura 49 sono riportate le curve relative alla radiazione solare globale orizzontale (G_h), produzione da parte dei pannelli fotovoltaici (PV), assorbimento energetico della pompa e assorbimento dalla rete elettrica per la giornata di prova dell'11 luglio 2021. Dal grafico è possibile notare l'assorbimento medio costante da parte della pompa (pari a circa $740 W_e$) ed il prelievo nullo dalla rete elettrica. Infatti, nei momenti in cui la produzione fotovoltaica risulta inferiore alla richiesta della pompa, l'impianto si affida anche all'accumulo elettrico, dimensionato in modo da garantire 9 ore circa di autonomia con batterie caricate al 100% e al netto dell'efficienza di conversione dell'inverter e del suo autoconsumo (valutabile in circa $25 W_e$ massimi in base alla scheda tecnica). La Figura 49 lascia intuire che, nel caso di funzionamento continuo del sistema di raffrescamento (quindi con pompa sempre accesa) e con scarsa radiazione solare disponibile, la taglia dell'impianto scelto ($300 W_e \times 4$ pannelli = $1200 W_e$ di picco) potrebbe non essere sufficiente per garantire una piena indipendenza energetica del sistema dalla rete elettrica, e quindi un funzionamento al 100% con energia rinnovabile. La taglia ottimale dell'impianto fotovoltaico va quindi scelta valutando con attenzione i cicli di accensione/spengimento della pompa, e considerando che quando la pompa è spenta ma vi è disponibilità di radiazione solare l'impianto PV può sfruttare l'energia elettrica prodotta per effettuare la ricarica delle batterie.

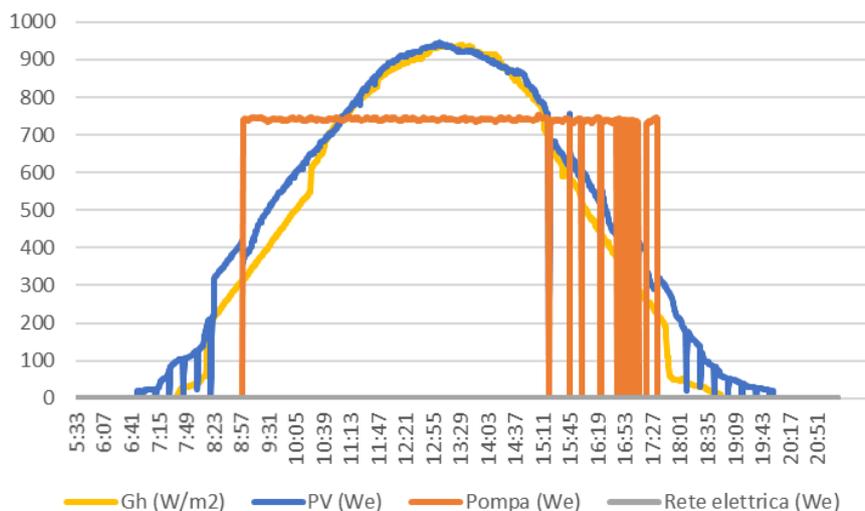


Figura 49. Radiazione solare globale orizzontale (G_h), produzione dai pannelli fotovoltaici (PV), assorbimento della pompa e assorbimento dalla rete elettrica in data 11 luglio 2021

3 Conclusioni

Il presente studio ha riportato i risultati di un'indagine numerico-sperimentale relativa a sistemi di raffrescamento evaporativo basati sulla micro-nebulizzazione, col fine di mitigare l'isola di calore urbana. Il prototipo sperimentale della struttura di raffrescamento evaporativo è stato concepito per raggiungere un elevato impatto locale, modulabile in funzione delle condizioni al contorno ed al minor costo possibile (sia in termini di investimento che operativo). L'obiettivo ultimo era caratterizzare compiutamente tale tecnologia e fornire indicazioni precise sui criteri di design da seguire per un pieno sfruttamento del potenziale di raffrescamento. Sono stati inoltre utilizzati due software fluidodinamici numerici (ANSYS Fluent ed ENVI-met) per simulare il comportamento della struttura di raffrescamento in un contesto, rispettivamente, di piccola scala e di scala micro-urbana; l'analisi numerica ha supportato le scelte progettuali e la conduzione delle prove sperimentali. In merito a quest'ultimo aspetto, due sono state le finalità principali dell'analisi sperimentale:

- valutare l'efficacia del sistema di raffrescamento, studiato in diverse configurazioni progettuali;
- valutare le sensazioni di comfort di un campione di individui nell'ambiente naturale indisturbato e in quello raffrescato, in termini di temperatura, umidità, sudorazione e soddisfazione globale per il sistema.

A tal fine, è stato ideato, installato e monitorato un sistema di nebulizzazione composto da 24 ugelli da 0,20 mm, posto su una struttura metallica nei pressi della Facoltà di Ingegneria dell'Università Politecnica delle Marche di Ancona. Sono stati valutati 5 layout progettuali del sistema, variabili per altezza degli ugelli (2,90, 2,60, 2,20 m), interasse tra gli ugelli (0,80 o 1,00 m), tipo di schermatura (schermatura solare presente o assente) e tipo di controllore della pompa (manuale o temporizzato). Queste configurazioni sono state confrontate a coppie, prendendo in esame due situazioni con un solo parametro variabile. In base ai risultati della sperimentazione, la soluzione più performante risulta essere quella con schermatura solare e ugelli posti a 2,20 m dal suolo. In questo caso, la temperatura scende fino a 4 °C all'interno dello spray, con un aumento massimo dell'umidità pari al 20%.

Attraverso la somministrazione di questionari relativi al comfort termoigrometrico, sono stati inoltre raccolti i voti degli utenti in relazione alla sensazione termica, di sudore, di umidità, di comfort e di soddisfazione globale nei confronti del sistema di raffrescamento. Globalmente, si è riscontrata una situazione di maggiore comfort all'interno dell'ambiente raffrescato dagli ugelli, dove la sensazione termica è più fresca, non si suda, è leggermente umido e piuttosto confortevole. Gli unici voti a non essere significativamente diversi tra quelli

espressi in zona raffrescata e non sono quelli relativi alla sensazione di umidità, e questo è a favore della sperimentazione in esame in quanto sta a significare che l'aumento di umidità non è percepito negativamente dagli utenti in termini di comfort.

4 Riferimenti bibliografici

- [1] IPCC, "Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change," 2021.
- [2] G. Ulpiani, "Water mist spray for outdoor cooling: A systematic review of technologies, methods and impacts," *Appl. Energy*, vol. 254, p. 113647, 2019.
- [3] M. Santamouris, "Using cool pavements as a mitigation strategy to fight urban heat island—A review of the actual developments," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 26, pp. 224–240, 2013.
- [4] Y. Qin, "A review on the development of cool pavements to mitigate urban heat island effect," *Renew. Sustain. energy Rev.*, vol. 52, pp. 445–459, 2015.
- [5] A. B. Besir and E. Cuce, "Green roofs and facades: A comprehensive review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 82, pp. 915–939, 2018.
- [6] M. Santamouris *et al.*, "Passive and active cooling for the outdoor built environment--Analysis and assessment of the cooling potential of mitigation technologies using performance data from 220 large scale projects," *Sol. Energy*, vol. 154, pp. 14–33, 2017.
- [7] M. Taleghani and U. Berardi, "The effect of pavement characteristics on pedestrians' thermal comfort in Toronto," *Urban Clim.*, vol. 24, pp. 449–459, 2018.
- [8] N. H. Wong and A. Z. M. Chong, "Performance evaluation of misting fans in hot and humid climate," *Build. Environ.*, vol. 45, no. 12, pp. 2666–2678, 2010.
- [9] B. Naticchia, M. D'Orazio, A. Carbonari, and I. Persico, "Energy performance evaluation of a novel evaporative cooling technique," *Energy Build.*, vol. 42, no. 10, pp. 1926–1938, 2010.
- [10] J. Wei and J. He, "Numerical simulation for analyzing the thermal improving effect of evaporative cooling urban surfaces on the urban built environment," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 51, no. 1–2, pp. 144–154, 2013.
- [11] H. Barrow and C. W. Pope, "Droplet evaporation with reference to the effectiveness of water-mist cooling," *Appl. Energy*, vol. 84, no. 4, pp. 404–412, 2007.
- [12] R. Sureshkumar, S. R. Kale, and P. L. Dhar, "Heat and mass transfer processes between a water spray and ambient air--I. Experimental data," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 28, no. 5–6, pp. 349–360, 2008.
- [13] R. Sureshkumar, S. R. Kale, and P. L. Dhar, "Heat and mass transfer processes between a water spray and ambient air--II. Simulations," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 28, no. 5–6, pp. 361–371, 2008.
- [14] L. A. Dombrovsky, V. P. Solovjov, and B. W. Webb, "Attenuation of solar radiation by a water mist from the ultraviolet to the infrared range," *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf.*, vol. 112, no. 7, pp. 1182–1190, 2011.
- [15] H. Montazeri, B. Blocken, and J. L. M. Hensen, "CFD analysis of the impact of physical parameters on evaporative cooling by a mist spray system," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 75, pp. 608–622, 2015.
- [16] R. C. G. M. Loonen, M. Trčka, D. Cóstola, and J. L. M. Hensen, "Climate adaptive building shells: State-of-the-art and future challenges," *Renew. Sustain. energy Rev.*, vol. 25, pp. 483–493, 2013.
- [17] G. Ulpiani, C. Di Perna, M. D'Orazio, and E. Di Giuseppe, "Analisi termo-fluido dinamica di soluzioni tecnologiche per la mitigazione locale del clima urbano," 2018.

- [18] M. Bruse and H. Fleer, "Simulating surface--plant--air interactions inside urban environments with a three dimensional numerical model," *Environ. Model. \& Softw.*, vol. 13, no. 3–4, pp. 373–384, 1998.
- [19] S. Coccolo, J. Kämpf, J.-L. Scartezzini, and D. Pearlmutter, "Outdoor human comfort and thermal stress: A comprehensive review on models and standards," *Urban Clim.*, vol. 18, pp. 33–57, 2016.
- [20] P. K. Cheung and C. Y. Jim, "Determination and application of outdoor thermal benchmarks," *Build. Environ.*, vol. 123, pp. 333–350, 2017.
- [21] P. Bröde *et al.*, "Deriving the operational procedure for the Universal Thermal Climate Index (UTCI)," *Int. J. Biometeorol.*, vol. 56, no. 3, pp. 481–494, 2012.
- [22] K. Zheng, M. Ichinose, and N. H. Wong, "Parametric study on the cooling effects from dry mists in a controlled environment," *Build. Environ.*, vol. 141, pp. 61–70, 2018.
- [23] C. Huang *et al.*, "The research and application of spray cooling technology in Shanghai Expo," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 31, no. 17–18, pp. 3726–3735, 2011.
- [24] ASHRAE, *ASHRAE Handbook - Fundamentals*. 2017.
- [25] ASHRAE, *ASHRAE Handbook - HVAC Applications*. 2015.
- [26] ASHRAE, *ASHRAE Handbook - HVAC Systems and Equipment*. 2016.
- [27] L. Chatzidimitriou, Angeliki Liveris, Panos Bruse, Michael Topli, "Urban Redevelopment and Microclimate Improvement," in *PLEA*, 2013.
- [28] ISO - International Organization for Standardization, *ISO 10456:2007 Building materials and products: Hygrothermal properties. Tabulated design values and procedures for determining declared and design thermal values*. 2007.
- [29] UNI - Ente Italiano di Normazione, *UNI 10351:2015 Materiali e prodotti per edilizia - Proprietà termoigrometriche - Procedura per la scelta dei valori di progetto*. 2015.
- [30] UNI - Ente Italiano di Normazione, *UNI 8477 Calcolo degli apporti solari*. 1985.
- [31] R. B. Clapp and G. M. Hornberger, "Empirical equations for some soil hydraulic properties," *Water Resour. Res.*, vol. 14, no. 4, pp. 601–604, 1978.
- [32] Dipartimento per il servizio geologico d'Italia, "ISPRA Archivio nazionale delle indagini nel sottosuolo (Legge 464/1984)," 2020. [Online]. Available: <http://sgi2.isprambiente.it/indagini/>. [Accessed: 15-May-2020].
- [33] J. A. V. Del Carpio, D. L. Marinoski, G. Trichès, R. Lamberts, and J. V. S. de Melo, "Urban pavements used in Brazil: Characterization of solar reflectance and temperature verification in the field," *Sol. Energy*, vol. 134, pp. 72–81, 2016.
- [34] P. C. L. Kwok and H.-K. Chan, "Pulmonary delivery of peptides and proteins," in *Peptide and protein delivery*, Elsevier, 2011, pp. 23–46.
- [35] Eurometeo, "Eurometeo," 2020. [Online]. Available: www.eurometeo.com. [Accessed: 06-May-2020].
- [36] G. Bonafè, "Microclima urbano: impatto dell'urbanizzazione sulle condizioni climatiche locali e fattori di mitigazione," *Area Meteorol. Ambient. Serv. IdroMeteorologico, ARPA EmiliaRomagna*, 2006.
- [37] D. 17/1/2018, *Norme Tecniche per le Costruzioni*. 2018.
- [38] F. Bañuelos-Ruedas, C. Á. Camacho, and S. Rios-Marcuello, "Methodologies used in the extrapolation of wind speed data at different heights and its impact in the wind energy resource assessment in a region," *Wind farm-Technical Regul. potential Estim. siting Assess.*, pp. 97–114, 2011.
- [39] M. Aydin, A. \cSi\csman, A. Gültekin, and B. Dehghan, "An experimental performance comparison

- between different shallow ground heat exchangers,” in *Proceedings World Geothermal Congress*, 2015, pp. 19–25.
- [40] G. Swamy, S. M. S. Nagendra, and U. Schlink, “Urban heat island (UHI) influence on secondary pollutant formation in a tropical humid environment,” *J. Air & Waste Manag. Assoc.*, vol. 67, no. 10, pp. 1080–1091, 2017.
- [41] J. Lindén, H. Simon, P. Fonti, J. Esper, and M. Bruse, “Observed and modeled transpiration cooling from urban trees in Mainz, Germany,” in *Proceedings of the ICUC9-9th International Conference on Urban Climate Jointly with 12th Symposium on the Urban Environment*, Toulouse, France, 2015, vol. 28.
- [42] S. Tsoka, A. Tsikaloudaki, and T. Theodosiou, “Analyzing the ENVI-met microclimate model’s performance and assessing cool materials and urban vegetation applications--A review,” *Sustain. cities Soc.*, vol. 43, pp. 55–76, 2018.
- [43] C. J. Willmott, “Some comments on the evaluation of model performance,” *Bull. - Am. Meteorol. Soc.*, vol. 63, no. 11, pp. 1309–1313, 1982, doi: 10.1175/1520-0477(1982)063<1309:SCOTEO>2.0.CO;2.
- [44] X. Yang, L. Zhao, M. Bruse, and Q. Meng, “Evaluation of a microclimate model for predicting the thermal behavior of different ground surfaces,” *Build. Environ.*, vol. 60, pp. 93–104, Feb. 2013, doi: 10.1016/j.buildenv.2012.11.008.
- [45] M. Zhang, C. Xu, L. Meng, and X. Meng, “Outdoor comfort level improvement in the traffic waiting areas by using a mist spray system: An experiment and questionnaire study,” *Sustain. Cities Soc.*, vol. 71, p. 102973, 2021.
- [46] G. Ulpiani, E. Di Giuseppe, C. Di Perna, M. D’Orazio, and M. Zinzi, “Thermal comfort improvement in urban spaces with water spray systems: Field measurements and survey,” *Build. Environ.*, vol. 156, pp. 46–61, 2019.
- [47] ASHRAE, *ASHRAE 55-1992 - Thermal environmental conditions for human occupancy*. 1992.

Curriculum scientifici del gruppo di lavoro

Gianluca Coccia

Ricercatore a Tempo Determinato (RTD-B) in Fisica Tecnica Industriale (ING/IND-10) presso il Dipartimento di Ingegneria Industriale e Scienze Matematiche della Facoltà di Ingegneria dell’Università Politecnica delle Marche. Docente degli insegnamenti di “Fisica tecnica ed impianti per il recupero edilizio” per il corso di laurea a ciclo unico in Ingegneria Edile-Architettura e di “Impianti termotecnici” per il corso di laurea in Ingegneria Meccanica. Autore di più di 40 pubblicazioni su riviste nazionali ed internazionali indicizzate e soggette a revisione dei pari, nel campo del solare termico, delle proprietà termofisiche dei fluidi, delle proprietà pressione-volume-temperatura di refrigeranti di nuova generazione e della gestione della domanda di energia. È editore associato per alcune riviste scientifiche internazionali e svolge attività di divulgazione nell’ambito delle energie rinnovabili e delle proprietà termofisiche dei fluidi.

Costanzo Di Perna

Professore Ordinario in Fisica Tecnica Ambientale, afferente al Dipartimento di Ingegneria Industriale e Scienze Matematiche della Facoltà di Ingegneria dell’Università Politecnica delle Marche. Docente di “Progettazione energetica degli edifici” e “Impianti di climatizzazione” presso la Facoltà di Ingegneria. Autore

di oltre 190 pubblicazioni in campo scientifico su riviste italiane ed internazionali nel settore della Fisica Tecnica. Responsabile di numerose attività di ricerca nel campo delle analisi energetiche di edifici e nella progettazione e realizzazione di impianti termici. È consulente per il Dipartimento da diversi anni di ditte del settore termotecnico per lo sviluppo e l'ottimizzazione di componenti. Inserito in comitati tecnici nazionali per lo sviluppo della normativa per la certificazione energetica ed energetica-ambientale. Svolge inoltre attività di divulgazione dell'evoluzione della normativa nell'ambito della certificazione energetica degli edifici e degli impianti tecnici per gli edifici.

Giovanni Di Nicola

Professore Ordinario in Fisica Tecnica Ambientale presso il Dipartimento di Ingegneria Industriale e Scienze Matematiche della Facoltà di Ingegneria dell'Università Politecnica delle Marche. Dal 1996 svolge attività di ricerca, sia sperimentali che teoriche, sulle proprietà termofisiche di fluidi refrigeranti puri e in miscela. Negli ultimi anni ha avviato una linea di ricerca su prototipi di inseguitori solari parabolici a concentrazione e forni solari con il fine ultimo di ottimizzarne l'efficienza termica, anche mediante l'utilizzo di nanofluidi. Dal 2003 è membro dell'Associazione Italiana Proprietà Termofisiche (AIPT). Dal 2011 è membro della Commissione B1 (Proprietà termodinamiche e di trasporto) dell'International Institute of Refrigeration (I.I.R.). Nel triennio 2011-2014, è stato membro dell'*editorial board* di "High Temperatures - High Pressures". Nel triennio 2012-2015, è stato membro dell'*editorial board* di "International Journal of Thermophysics" e di "American Journal of Physical Chemistry". È autore di oltre 140 articoli su riviste internazionali soggetti a revisione dei pari.

Marco D'Orazio

Professore Ordinario in Architettura Tecnica presso il dipartimento DICEA dell'Università Politecnica delle Marche. Ha conseguito due lauree (Ingegneria Edile ed Architettura) nonché il Dottorato di Ricerca in Ingegneria Edile. Già presidente della Società Scientifica di Architettura Tecnica, è attualmente Pro-Rettore presso l'Università Politecnica delle Marche. È presidente di commissioni tecniche nazionali ed esperto nazionale in commissioni tecniche europee. Dal 1990 si occupa di sviluppo, ottimizzazione e valutazione prestazionale di componenti edili. Ha all'attivo il coordinamento e la partecipazione a numerosi progetti di ricerca nazionali ed internazionali inerenti tali tematiche. È autore o coautore di oltre 260 pubblicazioni, tra cui monografie, articoli in riviste internazionali *peer-reviewed* e contributi a convegni qualificati a livello nazionale ed internazionale.

Elisa Di Giuseppe

Professore Associato in Architettura Tecnica presso il dipartimento DICEA dell'Università Politecnica delle Marche, Dottore di Ricerca in architettura, costruzioni e strutture. Dal 2007 si occupa di sviluppo, ottimizzazione e valutazione prestazionale di componenti edili, con particolare interesse verso l'efficienza energetica, l'interazione con l'uomo, la sostenibilità ambientale ed economica nel ciclo di vita. Ha partecipato o contribuito al coordinamento di numerosi progetti di ricerca nazionali ed internazionali inerenti tali tematiche. È docente dei corsi "Sostenibilità delle Costruzioni" (Ing. Edile) e "Recupero tecnologico degli edifici esistenti" (Ing. Edile-Architettura). È autrice o coautrice di oltre 110 pubblicazioni, tra cui monografie, articoli in riviste internazionali *peer-reviewed* e contributi a convegni qualificati a livello nazionale ed internazionale.