

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI ROMA SAPIENZA



SAPIENZA
UNIVERSITÀ DI ROMA

FACOLTÀ DI INGEGNERIA

Dipartimento di Ingegneria Astronautica, Elettrica ed Energetica

XXX ciclo del corso di dottorato in "Energia e Ambiente"

**BENESSERE TERMOIGROMETRICO IN AMBIENTE
ESTERNO ED INTERNO: SVILUPPO DI MODELLI
PREDITTIVI, ANALISI DI MATERIALI INNOVATIVI E
RIPERCUSSIONI SUI CONSUMI ENERGETICI**

SUPERVISORE:

Prof. Andrea de Lieto Vollaro

DOTTORANDO:

Iacopo Golasi

Anno Accademico 2016/2017

INDICE

ABSTRACT	6
1. L'OUTDOOR THERMAL COMFORT E GLI INDICI DI VALUTAZIONE.....	8
1.1. Introduzione.....	8
1.2. Caratteristiche delle field surveys precedenti.....	12
1.3. Field survey.....	15
1.4. Study area.....	18
1.5. Thermal comfort indices	20
1.6. Risultati e discussioni	22
1.6.1. Valori neutrali di PET e temperatura dell'aria	22
1.6.2. Valori preferiti della PET	25
1.6.3. "Optimal" comfort ranges.....	26
1.6.4. Verso il nuovo Mediterranean Outdoor Comfort Index (MOCI).....	28
1.6.5. Correzione della relazione della Predicted Percentage of Dissatisfied (PPD).....	32
1.7. Confronto tra le prestazioni del MOCI e quelle di altri indici.....	34
1.7.1. Analisi dei dati.....	34
1.7.2. Risultati e discussioni	35
1.8. Il Global Outdoor Comfort Index.....	41
1.8.1. La formulazione dell'indicatore.....	41
1.8.2. Valutazione analitica e peso delle variabili indipendenti	43
1.8.3. Confronto con altri indici.....	45
2. OUTDOOR THERMAL COMFORT, STRATEGIE DI MITIGAZIONE E MATERIALI INNOVATIVI	52
2.1. Introduzione.....	52
2.2. La taratura del modello.....	56
2.3. Il sito studiato	56
2.4. Area Input File	57
2.4.1. File Header	58
2.4.2. Main sections II/III: Buildings and Plants/Buildings Bottoms	60
2.4.3. Main sections IV: Soils	62
2.5. Configuration File.....	65
2.5.1. Basic settings.....	65
2.5.1.1. Start Simulation at Day (DD. MM. YYYY)	65

2.5.1.2. Start Simulation at Time (HH. MM. SS) / Total Simulation Time in Hours	67
2.5.1.3. Wind Speed in 10 m above Ground [m/s]	67
2.5.1.4. Roughness Length z_0 at Reference Point.....	68
2.5.1.5. Initial Temperature Atmosphere/Wind direction/Specific Humidity in 2500 m.....	68
2.5.1.6. Relative Humidity in 2 m	69
2.5.2. Optional sections.....	70
2.5.2.1. Buildings.....	70
2.5.2.2. Clouds.....	70
2.5.2.3. Soil Data	71
2.5.2.4. Solar Adjust.....	72
2.5.2.5. Timing.....	72
2.5.2.6. Time Steps.....	72
2.5.2.7. Turbulence.....	72
2.5.2.8. LBC-types	73
2.5.2.9. Nesting Area	73
2.5.2.10. PMV	74
2.6 Confronto tra i dati sperimentali ed i risultati delle simulazioni	74
2.6.1. Microclima	74
2.6.2. L'influenza delle Lateral Boundary Conditions (LBC)	82
2.6.3. Outdoor thermal comfort	84
2.7. Configurazioni alternative delle superfici limite.....	87
2.8. Simulazioni.....	90
2.9. Risultati	92
2.9.1. Caso estivo	93
2.9.2. Caso invernale.....	96
2.9.3. Il PMV nel chiostro	100
2.10. Considerazioni	102
2.10.1. Caso estivo	103
2.10.2. Caso invernale	105
2.11. Materiali innovativi e canyon urbani afferenti alla Local Climate Zone LCZ 2 ₃	106
2.11.1. Selezione e descrizione del caso studio	106

2.11.2. Caratterizzazione dei materiali innovativi e configurazioni analizzate del sito	107
2.11.3. Simulazioni in ENVI-met e validazione dei risultati	109
2.11.4. Outdoor thermal comfort	112
2.12. Il caso del campus dell'Università degli Studi "Sapienza" di Roma.....	118
2.12.1. Il sito studiato	119
2.12.2. Scenari proposti.....	120
2.12.3. Settaggio per le simulazioni numeriche e validazione del modello	122
2.12.4. Risultati e discussioni.....	126
3. SULLA CORRELAZIONE TRA OUTDOOR THERMAL COMFORT E TURISMO: DAL PANORAMA ITALIANO A QUELLO MONDIALE	133
3.1. Introduzione.....	133
3.2. L'area studiata	134
3.2.1. Classificazione climatica ed informazioni meteorologiche	134
3.2.2. Dati relativi ai flussi turistici.....	135
3.2.3. Dati meteorologici	138
3.3. Risultati	139
3.3.1. Andamenti orari annuali di temperatura dell'aria, MOCI e PMV	140
3.3.2. Frequenze relative alla percezione termica e percentili	144
3.3.3. Mappe spaziali delle medie stagionali di MOCI e PMV	146
3.4. Discussioni	150
3.4.1. Analisi temporale nelle località studiate.....	150
3.4.2. Analisi spaziale delle mappe del territorio italiano.....	151
3.5. La percezione termica di un individuo adattato al clima mediterraneo nei vari continenti.....	152
3.5.1. Caratteristiche degli spostamenti della popolazione italiana verso altre nazioni.....	152
3.5.2. I dati meteorologici adoperati	153
3.6. Risultati	153
3.6.1. Distribuzione annuale oraria e settimanale delle varie grandezze.....	154
3.6.2. Frequenze relative alla percezione termica e percentili	156
3.6.3. Classificazione delle località in funzione delle condizioni di comfort stagionale	158
3.6.4. Mappe spaziali stagionali	159
3.7. Discussioni	162
3.7.1. Analisi temporale nelle località studiate.....	162

3.7.2. Analisi delle mappe spaziali	164
4. THERMAL COMFORT E TEMPERATURA DI COLORE DELLA LUCE: UN POSSIBILE CONTRIBUTO AL RISPARMIO ENERGETICO?	165
4.1. Introduzione.....	165
4.2. Set-up sperimentale	167
4.3. Partecipanti alla field survey	169
4.4. Il questionario.....	170
4.5. Procedura sperimentale	170
4.6. Risultati e discussioni	172
5. CONCLUSIONI	179
RINGRAZIAMENTI.....	186
PUBBLICAZIONI EFFETTUATE DAL CANDIDATO	187
REFERENCES	189

ABSTRACT

Nell'ambito del presente lavoro di tesi sono stati investigati differenti aspetti legati al thermal comfort in ambiente interno ed esterno. Per quanto concerne gli ambienti aperti, sono stati sviluppati modelli predittivi della percezione termoigrometrica, è stata valutata l'influenza sul microclima di materiali innovativi e di varie strategie di mitigazione e si è proceduto a mappare, attraverso opportuni indici, il territorio italiano e globale in relazione anche ai flussi turistici nazionali ed intercontinentali. Per gli spazi indoor è stata invece valutata la relazione intercorrente tra sensazione termica e temperatura di colore della luce con l'obiettivo di ridurre i consumi energetici.

La tesi è stata quindi suddivisa in cinque sezioni. Nella prima sono stati individuati, con riferimento all'area mediterranea, i valori della Physiological Equivalent Temperature (PET) neutrale e preferita, della temperatura dell'aria neutrale, del Physiological Equivalent Temperature (PET) comfort range ed è stato ricavato un nuovo indice empirico in grado di predire, sulla base dell'ASHRAE 7-point scale, la sensazione termica della popolazione mediterranea in ambienti aperti. Questo indice, denominato MOCI (Mediterranean Outdoor Comfort Index), predice però un voto medio ed è per tale ragione che è stata anche riadattata alla popolazione mediterranea la relazione della PPD (Predicted Percentage of Dissatisfied) proposta nell'ISO 7730.

Le prestazioni del MOCI sono state poi confrontate numericamente con quelle di Actual Sensation Vote Europe (ASV_{EUROPE}), Effective Temperature (ET), Physiological Equivalent Temperature (PET) e Predicted Mean Vote.

È stato inoltre proposto e validato il Global Outdoor Comfort Index (GOCI), un indice empirico in grado di predire la percezione termica a livello globale.

Nella seconda sezione sono state invece analizzate differenti strategie di mitigazione del microclima urbano. I siti analizzati sono il campus dell'Università degli Studi Sapienza di Roma, il chiostro di San Pietro in Vincoli (sede della Facoltà di Ingegneria del medesimo Ateneo) ed il canyon urbano di via delle Carrozze, anch'esso sito in Roma. Oltre ad un aumento dello urban greening, sono state implementate configurazioni caratterizzate dall'uso di materiali ad elevato coefficiente di albedo. L'analisi dei valori assunti dalle variabili micrometeorologiche e dagli indici di comfort termico è stata possibile grazie a modelli validati sperimentalmente ed elaborati attraverso il software ENVI-met. Per quest'ultimo, è stato inoltre proposto un nuovo approccio simulativo basato su dati provenienti da radiosondaggi.

Nella terza sezione è stata valutata, con riferimento al territorio italiano e mondiale, la percezione termica di un individuo afferente all'area mediterranea (mediante il MOCI) e quella di un normotipo globale (mediante il PMV). I risultati, relazionati ai flussi turistici, sono stati elaborati in termini di andamenti orari annuali, valori medi settimanali e relativi picchi, diagrammi di frequenza, variazioni dei percentili e mappe spaziali.

Nella quarta sezione, diversamente rispetto a quanto fatto in precedenza, vengono discussi aspetti legati al benessere termoigrometrico in ambiente interno. In particolare, si è cercato di valutare se la temperatura di colore della luce è in grado o meno di influenzare la percezione termica. Questo studio è stato effettuato in collaborazione con la "Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos de la Universidad de Granada" e mira a ridurre i consumi energetici degli edifici. Per esempio, la temperatura di uno spazio confinato potrebbe essere inferiore in presenza

di una luce con bassa temperatura di colore durante la stagione di riscaldamento e viceversa durante quella di raffrescamento. È stata quindi organizzata, all'interno di una test room, una field survey in cui sono state esaminate la percezione e preferenza termica, la tolleranza e l'accettabilità personale e la confortevolezza nello svolgere un dato compito in presenza di luce calda, neutrale e fredda.

Nella quinta ed ultima sezione vengono infine riportati i risultati ottenuti.

1. L'OUTDOOR THERMAL COMFORT E GLI INDICI DI VALUTAZIONE

1.1. Introduzione

Lo studio e la valutazione dello stress e del comfort termico in ambiente esterno è forse il settore più interessante tra quelli investigati dalla biometeorologia umana. Lo stress termico comporta infatti una diminuzione nell'uso degli spazi esterni [1] ed influenza negativamente la salute degli individui [2]. Da questo punto di vista, alcuni studi [1][3][4] hanno rilevato un aumento del tasso di mortalità in condizioni di caldo intenso: durante l'ondata di calore che nell'estate 2003 ha colpito l'Europa centrale, sono state ad esempio registrate più di 70,000 [5] morti addizionali dovute alle condizioni esterne [1]. In particolare, per quelle popolazioni non adattate a condizioni calde, il rischio di un aumento nel tasso di mortalità sussiste anche a temperature relativamente basse. Se nelle regioni equatoriali tale aumento è ravvisato al di sopra dei 32 °C, per città come Londra o Stoccolma esso occorre già a 21-23 °C [4]. La situazione è poi amplificata dal fatto che le città costituiscono una struttura complessa e modificano le condizioni atmosferiche nello urban canopy layer, conducendo al fenomeno della Urban Heat Island, la cui intensità dipende da forma, materiali e densità della struttura urbana.

Inoltre, tenendo conto che i futuri trend climatici porteranno ad amplificare i suddetti effetti [6], è necessario già da oggi sviluppare strumenti e metodologie per diminuire l'entità dello stress termico. Questi strumenti analitici devono condurre ad una accurata progettazione degli arredi e dei materiali che costituiscono il tessuto urbano (grazie alla possibilità, attraverso modelli simulativi, di predire il suo microclima), alla scelta del verde negli spazi aperti degli agglomerati cittadini [7][8][9] ed allo sviluppo di sistemi di monitoraggio e di allerta in caso di rischio per la salute della popolazione più esposta [10].

Per tale ragione sono stati sviluppati diversi indici e modelli per quantificare la percezione legata agli scambi termici tra il corpo umano e l'ambiente circostante [11][12]. Molti di questi sono stati però creati per valutare la percezione termica in ambiente interno [11][13] e, per essere usati in ambiente esterno, è stato necessario un processo di aggiustamento. Un esempio è dato dal Predicted Mean Vote (PMV) [14]: sebbene il suo uso è suggerito da standard come ISO 7730 [15] e ASHRAE 55 [16], per essere adattato agli ambienti esterni è stato necessario includere nel modello la shortwave radiation [17]. Un approccio simile ha riguardato la (rational) Standard Effective Temperature (SET*) [18], adattata successivamente alla OUT_SET* [19]. Per altri indici, i problemi legati alla predizione dell'outdoor thermal comfort derivano dalle assunzioni fatte. È questo il caso dell'Effective Temperature (ET) [20], che imposta valori di thermal clothing insulation e metabolic rate compatibili con un'attività sedentaria in ambiente interno. Una situazione simile caratterizza la Physiological Equivalent Temperature (PET) [21], il cui calcolo assume un isolamento del vestiario di 0.9 clo (1 clo = 0.155 m²KW⁻¹) ed un tasso metabolico di 80 W (da sommare al metabolismo basale). I parametri di riferimento dati per lo Universal Thermal Climate Index (UTCI) [22] conducono invece ad una walking speed di 1.1 m/s e ad un tasso metabolico di 135 W/m² (riguardano quindi solo l'attività svolta).

Le difficoltà riscontrate nella predizione dell'outdoor thermal comfort risiedono anche in fattori quali adattamento comportamentale e sociale, adattamento fisiologico ed acclimatamento [23].

Conseguentemente, a parità di condizioni microclimatiche, vengono registrate differenze tra la percezione termica di soggetti residenti in regioni con differente classificazione climatica di Köppen-Geiger [24]. In uno studio effettuato in Europa, Nikolopoulou and Lykoudis [25] hanno valutato il comfort termico in 7 differenti città (Atene, Cambridge, Friburgo, Kassel, Milano, Sheffield e Salonicco) coprendo 5 nazioni. Sono state riscontrate variazioni fino a 10 °C della temperatura neutrale ed un trend di tale variabile che appare seguire quello delle temperature climatiche su base stagionale. Sono stati ad esempio riscontrati, durante il periodo estivo, valori neutrali per la temperatura dell'aria di 15.8 °C per Fribourg (Switzerland) e Sheffield (UK), di 18.0 °C per Cambridge (UK) e superiori ai 28 °C per Athens e Thessaloniki (Greece). Per Rome (Italy) è stato poi determinato il valore di 27.2 °C [26], leggermente inferiore rispetto a quello delle due città greche. La situazione è simile in inverno, con valori che vanno dai 10.8 °C di Sheffield (UK) [25] ai 22.1 °C di Rome (Italy) [26]. In altri studi, tali differenze sono state evidenziate attraverso la PET: è questo il caso di Taichung City (Taiwan) [27], Cairo (Egypt) [28], Hong Kong (China) [29], Sydney (Australia) [26] e Damascus (Syria) [31]. In particolare, nell'ultimo studio [31] le differenze in termini di percezione termica sono state quantificate anche attraverso la OUT_SET* ed è stata rilevata una certa influenza dell'alliesthesia [30], un meccanismo psicologico che porta le persone a percepire come confortevole qualsiasi cosa possa scaldarle quando le condizioni microclimatiche sono fredde e viceversa.

Tali differenze hanno portato alcune ricerche a focalizzare la loro attenzione sui limiti delle scale di comfort termico [32][33][34][35][36][37]. Md Din et al. [32] hanno ad esempio tarato i limiti delle categorie "partially comfortable" e "uncomfortable" del Discomfort index [38] per la popolazione malesiana. Pantavou et al. [33] hanno calibrato i limiti delle scale di vari indici ad Athens (Greece) ed hanno trovato come la probit analysis permette di ottenere risultati migliori rispetto ad una regressione cubica o lineare. Kántor et al. [34] hanno messo in luce i differenti PET thermal sensation ranges tra Taiwan e Szeged (Hungary) mentre Lin and Matzarakis [35] hanno fatto lo stesso tra Sun Moon Lake (Taiwan) e la Western/Middle Europe. Krüger et al. [36] hanno poi esaminato i dati ottenuti attraverso field surveys a Curitiba (Brazil), Rio de Janeiro (Brazil) e Glasgow (UK) per individuare una procedura preliminare di calibrazione della PET. Hanno inoltre determinato e confrontato i valori della PET corrispondenti alle varie thermal comfort/stress categories. Con riferimento al comfort range, un confronto simile è stato effettuato anche da Hirashima et al. [37]. Essi hanno infatti evidenziato le differenze intercorrenti tra i risultati del loro studio effettuato a Belo Horizonte e quelli di ricerche svolte in altre regioni climatiche.

Altri studi hanno invece testato le prestazioni di alcuni indici, cercando in alcuni casi di migliorarne l'abilità predittiva. Pantavou et al. [39] hanno trovato come, con riferimento ad Athens (Greece) ed a seguito di una field survey, la maggior parte degli indici considerati è in grado di predire circa il 35% dei voti dati dagli intervistati. Valori inferiori al 25% sono stati invece rilevati da Ruiz and Correa [40] per sei differenti indici a Mendoza (Argentina). Tseliou et al. [41] hanno poi comparato PET, Temperature-Humidity Index (THI) [38] e Wind Chill Index (K) [42] mostrando una forte correlazione con la temperatura media climatica del luogo ed hanno usato questa variabile per aggiustare i modelli esaminati. Un tentativo simile è stato fatto anche da Köppe and Jendritzky [43]: essi hanno però adoperato un terzo della differenza tra il valore giornaliero dell'indice ed il suo limite. Ciò ha permesso loro di calibrare i limiti della scala di comfort termico considerando

l'acclimatamento derivante da brevi tempi di esposizione. Blazejczyk et al. [11] hanno infine evidenziato la capacità di molti indici di stimare in maniera soddisfacente le condizioni biometeorologiche solo a fronte di certe condizioni microclimatiche.

Per questa ragione vi è negli ultimi anni un crescente interesse verso la creazione di indici sviluppati appositamente per l'ambiente esterno, non fondati su assunzioni tipiche degli spazi confinati ed in grado di contemplare la differente percezione termica delle varie popolazioni. E' stata quindi riscontrata la tendenza a creare indici empirici [13]. La metodologia comunemente adottata prevede lo svolgimento di una field survey in cui gli intervistati giudicano l'ambiente termoigrometrico esterno attraverso una data scala sensoriale. Contemporaneamente vengono misurate le variabili micrometeorologiche e ciò permette di sviluppare, attraverso regressioni multiple, modelli in grado di predire la percezione termica umana. Indici empirici di questo tipo sono stati creati in varie nazioni, coprendo differenti climi e culture (Fig. 1.1).

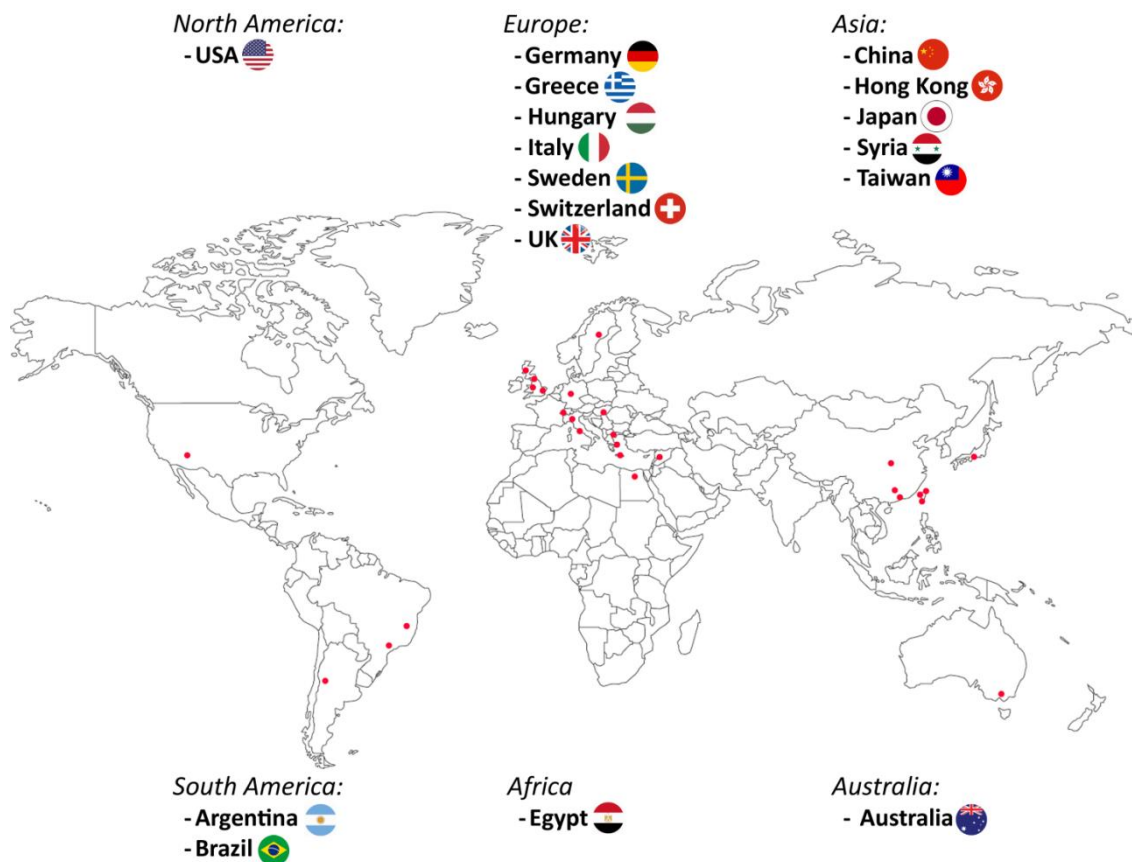


Figura 1.1. Individuazione dei luoghi in cui sono state ottenute relazioni empiriche per la predizione dell'outdoor thermal comfort.

L'ipotesi alla base dello studio è quindi che la predizione del comfort termico negli spazi aperti richiede un approccio soggettivo per una data popolazione adattata a certe condizioni climatiche e culturali (regole, norme e valori) [44]. Per questa ragione, è stata effettuata una field survey trasversale a Roma durante la quale sono stati compilati oltre 1,000 questionari in un interno anno e rilevati contemporaneamente i valori di temperatura dell'aria, temperatura media radiante, umidità rela-

tiva, velocità del vento ed irradiazione globale. Nella prima parte dei questionari sono stati investigati i fattori personali (età, genere, vestiario, livello di attività...) mentre nella seconda gli intervistati hanno giudicato la loro percezione termica attraverso l'ASHRAE 7-point scale (cold (-3), cool (-2), slightly cool (-1), neutral (0), slightly warm (+1), warm (+2) and hot (+3)) e la loro preferenza termica attraverso la McIntyre scale (cooler (-1), no change (0) and warmer (+1)). Per ogni questionario è stato poi calcolato il corrispondente valore della PET.

I propositi dello studio mirano a dare strumenti ed informazioni utili ad architetti, ingegneri, designers ed urban planners per la progettazione o riqualificazione di spazi outdoor nell'area mediterranea. Sono stati quindi determinati i valori della PET neutrale e preferita, del PET comfort range ed è stato ricavato un nuovo indice empirico in grado di predire, con riferimento all'ASHRAE 7-point scale, la sensazione termica della popolazione mediterranea in ambienti aperti. Questo indice, che sarà denominato MOCI (Mediterranean Outdoor Comfort Index), predice però un voto medio; può quindi essere utile conoscere il numero di persone termicamente insoddisfatte sotto certe condizioni climatiche. Per tale ragione, è stata anche adattata alla popolazione mediterranea la relazione della PPD (Predicted Percentage of Dissatisfied) proposta nell'ISO 7730 [45].

Nell'ambito della presente ricerca, il MOCI è stato inoltre confrontato numericamente con altri indici di comfort termico comunemente adoperati: l'Actual Sensation Vote Europe (ASV_{EUROPE}) [25], l'Effective Temperature (ET) [46], la Physiological Equivalent Temperature (PET) [21] ed il Predicted Mean Vote (PMV) [47]. Per effettuare tale comparazione è stata quindi svolta una seconda field survey a Roma. Essa ha avuto la durata di 5 mesi (da giugno 2015 a novembre 2015) e, contemporaneamente a misure micrometeorologiche, 592 individui scelti casualmente hanno compilato un questionario strutturato in accordo con l'ISO 10551 [48]. Essa ha avuto le stesse modalità di quella che ha portato alla creazione del MOCI e, dai valori delle variabili ambientali misurate e da quelli delle variabili operative rilevati attraverso i questionari, è stato poi possibile calcolare i valori dei vari indici, associandoli ad ogni questionario e di conseguenza al voto dato dall'intervistato. Ciò ha permesso di effettuare un confronto numerico tra gli indici analizzati attraverso quattro differenti criteri (tre statistici ed uno qualitativo): Spearman's rho measure of correlation, symmetrical measure of association Gamma, percentuale di predizioni corrette totali e per ciascuna classe (valutate attraverso una sorta di cross-tabulation analysis). Sono stati infine trattati anche aspetti legati all'adattamento degli individui alle condizioni esterne e alle variazioni stagionali dei valori assunti dagli indici.

Occorre però dire, come si può notare in Fig. 1, che gli indici empirici sviluppati non sono uniformemente distribuiti sul territorio globale. Differiscono inoltre per la tipologia di variabili indipendenti. Alcuni studi hanno infatti usato le variabili micrometeorologiche misurate durante la field survey [25][26][29][49][50][51][52][53][54], altri i corrispondenti valori di Physiological Equivalent Temperature [27][28][31][34][55][56][57][58][59][60][61][62], Standard Effective Temperature [63] o Predicted Mean Vote [64]. Tale varietà implica delle problematiche, come quelle connesse alla difficoltà di effettuare confronti tra i risultati di differenti studi [13].

Per questa ragione, il presente studio propone inoltre il Global Outdoor Comfort Index (GOCI), un indice empirico in grado di predire la percezione termica in qualsiasi luogo e condizione. Esso nasce dalla necessità di standardizzazione manifestata nel settore degli outdoor thermal comfort

indexes [13] e viene sviluppato combinando le varie relazioni empiriche esistenti in bibliografia. Questo nuovo indice, inoltre, può costituire un utile strumento per la progettazione di spazi aperti in quelle aree o categorie climatiche in cui non sono stati sviluppati specifici indici empirici. Le prestazioni del GOCI sono quindi state confrontate con quelle di due indici termofisiologici quali PMV e PET e con quelle del MOCI. E' stata infine valutata l'influenza che ciascuna variabile ha sul rifiuto o sull'accettazione di date condizioni microclimatiche da parte di un individuo medio (capace di riassumere le caratteristiche di tutti i soggetti che hanno portato alla definizione di diversi indici empirici reperibili in bibliografia) e analizzata la dipendenza stagionale del GOCI in funzione della temperatura dell'aria per le differenti classi di thermal perception votes.

1.2. Caratteristiche delle field surveys precedenti

Anche se l'outdoor thermal comfort è un campo di ricerca relativamente nuovo, durante l'ultima decade il numero di studi su questo argomento è progressivamente aumentato [13]. Questi studi sono stati effettuati in varie nazioni coprendo differenti climi e culture e spesso sono stati condotti attraverso field surveys (Tab. 1.1).

Per quanto concerne la loro tipologia, più dell'80% di questi studi sono trasversali; questo significa che ogni persona ha partecipato al sondaggio solo una volta. La restante parte degli studi sono invece basati su un approccio longitudinale che prevede l'esposizione di un limitato numero di soggetti a differenti situazioni microclimatiche in differenti momenti della field survey. Questa tipologia di studi vede un numero di soggetti coinvolti compreso tra 8 e 36 mentre, nel caso di un approccio trasversale, esso varia tra 91 e 2,700.

Nella scelta dei siti, sono stati privilegiati spazi aperti pubblici come parchi, piazze e strade pedonali collocati nei centri delle città; solo alcuni studi hanno incluso località periferiche o suburbane, mentre in 6 casi lo studio è stato condotto all'interno di campus universitari. Il numero di siti inclusi nella singola campagna risulta comunque compreso tra 1 e 13 ed è proporzionale al numero di soggetti intervistati.

Una maggiore variabilità è stata riscontrata per la lunghezza delle field surveys: essa è compresa tra un singolo giorno ed un intero anno. In molti studi è stata analizzata più di una stagione, tipicamente estate ed inverno, mentre in altri casi è stato coperto consecutivamente un periodo più lungo (i.e., un intero anno). Gli studi differiscono anche per la parte del giorno in cui è stata effettuata la field survey: in molti casi essi hanno avuto luogo nel pomeriggio mentre un numero minore ha incluso mattina e sera. E' importante focalizzare l'attenzione sul fatto che circa metà degli studi revisionati hanno trovato una differenza stagionale nei ranges di comfort termico e/o nelle temperature neutrali. Questo ha rivelato l'influenza della stagione sulla percezione termica e quindi su come gli intervistati rispondono ai questionari: questa influenza risulta essere più sensibile in climi caratterizzati da stagioni distinte, come ad esempio quello mediterraneo.

Un'altra differenza tra gli studi revisionati riguarda il design del questionario. Anche se tutti gli studi, tranne due, hanno incluso una domanda sulla percezione termica del tipo "How do you feel right now?", sono state adoperate scale di giudizio soggettive differenti. La scala più comune è la cosiddetta ASHRAE 7-point scale (cold (-3), cool (-2), slightly cool (-1), neutral (0), slightly warm (+1), warm (+2), hot (+3)), che è stata usata in 14 studi mentre in 11 casi è stata una 5-point scale. In 4

studi è stata usata poi una 9-point scale, mentre Stathopoulos et al. [65] hanno chiesto nel questionario di valutare alcune affermazioni (e. g., “la temperatura dell’aria è elevata”, “l’aria è umida”, “la velocità del vento è alta”, “la radiazione solare è intensa”) mediante una 5-point scale da disagree (-2) ad agree (+2) con la possibilità di scegliere una condizione di incertezza (0). La situazione è invece differente per quanto riguarda le surveys di Xi et al. [66] e di Kántor et al. [34][55]: essi hanno infatti usato scale differenziali (continue) che hanno permesso agli intervistati di scegliere anche valori compresi tra i voti fissi (i.e., il voto -1.5 tra fresco e leggermente fresco poteva essere scelto). Una scelta diversa, per quanto concerne la percezione termica, è stata infine fatta da Sangkertadi [67] che ha adoperato una 7-point scale ma con valori compresi tra -2 (cold) e +4 (very-very hot and feel pain) e mantenendo in corrispondenza del voto 0 la neutralità termica.

Più di metà degli studi hanno incluso anche delle domande sulla preferenza del tipo “How would you prefer to be now?” e la variabile più frequentemente investigata è la temperatura dell’aria: la preferenza termica viene infatti valutata in 13 studi. In un numero minore di casi viene studiata la preferenza per altre variabili quali vento (11 studi), radiazione solare (10 studi) ed umidità (9 studi). Analogamente a quanto accade per la percezione termica, vengono usate differenti scale ed in questo caso la più diffusa è la cosiddetta McIntyre scale [68] (cooler (-1), no change (0), warmer (+1)).

Per quanto riguarda invece la valutazione del comfort termico, della neutralità e della preferenza, tutti gli studi, tranne 4, hanno valutato almeno un indice. Da questo punto di vista, quello più comunemente usato è la Physiological Equivalent Temperature (PET), seguito dalla (rational) Standard Effective Temperature (SET*) e dal Predicted Mean Vote (PMV). L’uso dei primi due indici è aumentato soprattutto negli ultimi anni, mentre è stato riscontrato un decremento nell’uso del PMV. La ragione può essere trovata nel fatto che differenti studi hanno rivelato una scarsa correlazione tra PMV e percezione termica soggettiva [69][70][71][29]. In due casi [72][73] è stato calcolato l’Universal Thermal Climate Index (UTCI), ma è probabile che il suo uso aumenti progressivamente in quanto la sua elaborazione è relativamente recente.

In circa metà degli studi gli indici di comfort termico vengono calibrati mediante le sensazioni termiche soggettive ed è stata riscontrata la tendenza ad adattare gli indici termici e le loro zone di comfort a livello nazionale o regionale. In molti casi la correlazione (R^2) viene aumentata usando valori medi delle sensazioni termiche soggettive in intervalli (bins) di temperatura di circa 1°C.

Per ottenere indici in grado di valutare l’outdoor thermal comfort a livello locale, stanno aumentando gli studi che relazionano, mediante regressioni multiple, le risposte degli intervistati sulla percezione termica alle variabili ambientali misurate [50][67][74][52][75][54][76]. A questo proposito, è necessario precisare che in tutti i casi eccetto uno [77] le misure hanno avuto luogo vicino al soggetto intervistato.

Infine, in alcuni studi sono stati determinati i valori neutrali della temperatura dell’aria o di un dato indice mentre più raramente sono stati determinati i valori preferiti.

Tabella 1.1. Informazioni relative alle field surveys precedenti.

City	Climate symbol	Latitude	Longitude	Altitude [m]	Season	Time of day	Votes
Mendoza, Argentina	BWh	32.4° S	68.5° W	750	July, December	Morning, afternoon, evening	622
Sydney, Australia	Cfa	33.9° S	151.2° E	19	All year	Not specified	1018
Curitiba, Brazil	Cfb	25.5° S	49.2° W	926	January-August	Morning to afternoon	1654
Sao Paulo, Brazil	Cfa	23.3° S	46.4° W	760	Summer, winter	Not specified	1750
Montreal, Canada	Dfb	45.5° N	73.5° W	30	Spring, autumn	Midday (noontime)	466
Guangzhou, China	Cfa	23.1° N	113.3° E	5	July	Daytime	114 ^A
Hong Kong, China	Cwa	22.3° N	114.2° E	142	Summer, winter	Morning, afternoon, evening	2702
Hong Kong, China	Cwa	22.3° N	114.2° E	142	Summer, winter	Morning, afternoon, evening	286 ^B
Nanjing, China	Cfa	32.0° N	118.8° E	30	August	Whole day	205
Cairo, Egypt	BWh	31.0° N	31.3° E	50	Summer, winter	Afternoon	300
Kassel, Germany	Cfb	51.3° N	9.5° E	178	All year	Morning to evening	824
Athens, Greece	Csa	38.0° N	23.7° E	70	All year	Morning to evening	1503
Thessaloniki, Greece	Cfa	40.6° N	22.9° E	44	All year	Morning to evening	1813
Szeged, Hungary	Cfb	46.3° N	20.1° E	77	Autumn, spring	Afternoon	967
Manado, Indonesia	Af	1.3° N	124.6° E	3	May to September	Morning to afternoon	300
Yotvata, Israel	BWh	29.6° N	34.9° E	86	July	24 h	~ 100 ^C
Milan, Italy	Cfb	45.5° N	9.2° E	122	All year	Morning to evening	1173
Matsudo, Japan	Cfa	35.8° N	139.9° E	9	March, May	Morning to afternoon	1142
Yokohama, Japan	Cfa	35.4° N	139.6° E	11	All seasons	Morning to afternoon	1134 ^D
Putrajaya, Malaysia	Af	2.9° N	101.7° E	45	March-April	Morning, afternoon	200
Lisbon, Portugal	Csa	38.7° N	9.2° W	84	March-April	Afternoon	91
Lisbon, Portugal	Csa	38.7° N	9.2° W	84	All year	Afternoon	943
Singapore, Singapore	Af	1.4° N	103.7° E	5	August-May	Morning, afternoon, evening	2036
Göteborg, Sweden	Cfb	57.7° N	12.0° E	36	July to October	Afternoon	285
Göteborg, Sweden	Cfb	57.7° N	12.0° E	36	October, January, April & June	Morning, afternoon	1379
Fribourg, Switzerland	Cfb	46.8° N	7.0° E	646	All year	Morning to evening	1920
Damascus, Syria	BSk	33.6° N	36.3° E	689	Summer, winter	Morning, afternoon	920
Chiayi, Taiwan	Cwa	23.3° N	120.4° E	252	Winter to summer	Not specified	1644 ^E
Taichung, Taiwan	Cwa	24.1° N	120.7° E	26	All year	Afternoon	505
Taichung, Taiwan	Cwa	24.1° N	120.7° E	26	Winter to summer	Not specified	1644 ^E
Yunlin, Taiwan	Cwa	23.7° N	120.5° E	18	Winter to summer	Not specified	1644 ^E
Birmingham, UK	Cfb	52.5° N	1.9° W	127	August–February	Afternoon	451

Cambridge, UK	Cfb	52.2° N	0.1° E	17	All year	Morning to evening	948
Glasgow, UK	Cfb	55.9° N	4.3° W	31	March to July	Morning to afternoon	573
Sheffield, UK	Cfb	53.4° N	1.5° W	97	All year	Morning to evening	1008
Rome, Italy (present study)	Csa	41.5° N	12.3° E	21	All year	Morning to evening	1564

^A A group of 21 students.

^B A group of 8 students.

^C A group of 36 students.

^D A group of 6 students.

^E Total for the three cities.

1.3. Field survey

Le field questionnaire surveys sono state svolte contemporaneamente a misure micrometeorologiche di temperatura dell'aria, velocità del vento, umidità relativa, globe temperature ed irradiazione globale. La ricerca che ha portato alla determinazione del MOCI ha avuto durata annuale (da febbraio 2014 a gennaio 2015) mentre quella effettuata per valutarne le prestazioni ha avuto la durata di 6 mesi (è cominciata a giugno 2015 ed è terminata a novembre 2015). Il campione della prima è costituito da più di 1,000 individui mentre quello della seconda da 592. Quest'ultima è stata poi estesa al periodo invernale per avere una base più completa al fine di valutare le prestazioni del GOCI. In quest'ultimo caso i dati analizzati afferiscono quindi al periodo che va da giugno 2015 ad aprile 2016 ed il campione complessivo è costituito da 869 persone.

Il campione di intervistati risulta essere in ogni caso superiore alle 400 unità costituenti il campione minimo [36] determinato attraverso l'Eq. (1):

$$n = \frac{N \cdot (1/E^2)}{N + (1/E^2)} \quad (1)$$

dove n è l'ampiezza minima del campione, N la popolazione della città in esame ed E è il sampling error (assunto pari al 5%).

Per quanto riguarda invece il periodo della giornata esaminato, è stato seguito l'approccio di Nikolopoulou et al. [25]: perciò la giornata è stata divisa in mattina (08:00-11:59), midday (12:00-14:59), pomeriggio (15:00-17:59) e sera (18:00-20:59). In alcuni casi è stato investigato uno solo di questi intervalli mentre in altri la durata è stata anche di un giorno intero; tali scelte sono sempre state fatte con la finalità di investigare condizioni quanto più possibili differenti tra loro e rappresentative dell'area mediterranea.

Ad ogni individuo è stato poi chiesto di compilare un questionario strutturato in accordo con l'ISO 10551 [48]. Nella prima parte esso ha investigato fattori personali quali età, genere, peso, altezza, tempo di residenza, vestiario, attività svolta al momento dell'intervista e trenta minuti prima. La seconda parte chiedeva invece all'intervistato di giudicare la propria percezione termoigrometrica attraverso l'ASHRAE 7-point scale. Va poi detto che gli individui che hanno preso parte alla survey sono stati scelti a caso e, in accordo con Kruger et al. [59], solo in fase di postprocessing è stato possibile escludere persone residenti da meno di 6 mesi e donne incinte. Sono stati inoltre computati solo i dati di intervistati che, al momento del questionario, erano stati esposti alle condizioni

esterne per almeno 15 minuti. Con riferimento all'indoor thermal comfort, questo è infatti the minimum space residency suggerito dall'ASHRAE Standard 55 [16] per tenere conto di fattori legati all'adattamento termico. Tale assunzione trova una conferma anche nello studio effettuato da Yang et al. [78] a Singapore: anche se il Kruskal-Wallis H test ha mostrato che il mean thermal sensation vote non era statisticamente differente per individui con differente exposure time, è stato possibile osservare come un maggior tempo trascorso all'esterno aiuti il corpo umano ad adattarsi ed essere più tollerante verso date sollecitazioni termiche.

Durante la compilazione dei questionari sono state misurate la temperatura dell'aria, la globe temperature, la velocità del vento, l'umidità relativa e la radiazione globale. Per la misura di quest'ultima variabile è stato usato un piranometro mentre per le altre quattro sono state adoperate delle sonde connesse ad una centralina microclimatica mobile (Tab. 1.2).

Tabella 1.2. Proprietà metrologiche degli strumenti usati per la misura delle variabili micrometeorologiche.

Tipo di sonda	Variabile misurata	Campo di misura	Risoluzione	Accuratezza
Termoresistenza al platino PT 100	T_A [°C]	-50 ÷ +80	0.01	±0.5 °C above -7 °C
Anemometro a filo caldo	WS [ms-1]	0 ÷ 45	0.01	±1 m/s
Psicrometro a ventilazione forzata	RH [%]	0 ÷ 100	0.1	±3 % (0-90 %), ±4 % (90-100 %)
Globotermometro	T_{GLOBE} [°C]	-40 ÷ 80	0.01	≤ 0.1 °C at 0 °C DIN 43760 1/3
Piranometro	I_G [Wm ⁻²]	0 ÷ 2000	10 ⁻³	±5 %

Ciò ha permesso di collocare la strumentazione ad una distanza inferiore a 3 m rispetto all'intervistato [30] e di regolare la sua altezza in base al centro di gravità del corpo umano [79]. Questa è stata impostata quindi a 0.6 m per intervistati seduti e ad 1.1 m per intervistati in piedi.

La compilazione del questionario ha richiesto poi circa 90 s. Ciò ha permesso di effettuare tre misure per ciascuna variabile, associando alla percezione termica di ogni intervistato il corrispondente valore medio. È stato inoltre necessario ricavare il valore della temperatura media radiante MRT, che in climi non ventosi come quello di Roma è la variabile che influenza maggiormente l'outdoor thermal comfort [26]. Per tale ragione è stata usata l'Eq. (2) [79]:

$$T_{MR} = \left[(T_{GLOBE} + 273.15)^4 + \frac{1.1 \cdot 10^8 \cdot WS^{0.6}}{\varepsilon \cdot D^{0.4}} \cdot (T_{GLOBE} - T_A) \right]^{0.25} - 273.15 \quad (2)$$

dove ε e D indicano l'emissività ed il diametro del globotermometro.

Un approccio differente merita invece la valutazione della velocità del vento. In questo caso vuole essere computata anche la sua variabilità ed è per questo che è stata usata l'Eq. (3), introdotta da Oliveira e Andrade [80] e da Andrade et al. [81]:

$$WS = WS_{MAX} + sWS \quad (3)$$

dove WS_{MAX} è il valore massimo misurato mentre sWS è la deviazione standard relativa alle tre misure effettuate.

Per ogni questionario sono stati inoltre calcolati i corrispondenti valori delle variabili operative. In particolare, il metabolic rate M è stato calcolato come una media pesata tra quelli corrispondenti alle attività svolte dall'intervistato al momento del questionario (M_1) e trenta minuti prima (M_2) (Eq. (4)) [16][82]:

$$M = 0.7 \cdot M_1 + 0.3 \cdot M_2 \quad (4)$$

Al valore di M così determinato, deve essere poi aggiunto quello rappresentativo del metabolismo basale M_B , determinato in funzione della fat-free body mass FFM attraverso l'Eq. (5) [83]:

$$M_B = 0.0484 \cdot (19.7 \cdot FFM + 743) \quad (5)$$

dove la fat-free body mass FFM viene calcolata sottraendo al peso corporeo the body fat BF , determinata per le donne e per gli uomini attraverso l'Eq. (6) e l'Eq. (7) rispettivamente [84]:

$$BF = 0.737 \cdot W - 5.15 \cdot H^3 + 0.37 \quad (6)$$

$$BF = 0.685 \cdot W - 5.86 \cdot H^3 + 0.42 \quad (7)$$

Deve essere poi specificato che la PET ed il PMV, indici con i quali il GOCI viene confrontato, sono stati calcolati mediante il software Rayman [85], che richiede l'inserimento del metabolic rate in Watt. Il valore ottenuto sommando M e M_B è stato quindi moltiplicato per la superficie cutanea di ciascun intervistato determinata, grazie ai valori di peso W ed altezza H riportati in ciascun questionario, attraverso l'Eq. (12)[16]:

$$Dubois\ area = 0.202 \cdot (W^{0.425} \cdot H^{0.725}) \quad (8)$$

Per quanto riguarda la determinazione della resistenza termica del vestiario, gli intervistati hanno potuto scegliere nel questionario tra una lista di differenti clothing ensembles [16]. Ciò ha permesso di calcolare il valore corrispondente di thermal clothing insulation $I_{CL\ INACTIVE}$. Va però detto che il movimento del corpo porta a introdurre aria attraverso le aperture del vestiario e/o a movimenti d'aria al suo interno. Conseguentemente, se l'attività svolta dall'intervistato comporta un metabolic rate superiore ad 1.2 met (1 met=58.2 W/m²), il corrispondente valore di thermal clothing insulation $I_{CL\ ACTIVE}$ è stato ottenuto mediante l'Eq. (9):

$$I_{CL\ ACTIVE} = I_{CL\ INACTIVE} \cdot (0.6 + 0.4/M) \quad (9)$$

Sono stati computati anche gli underwear garments [49]. È stato quindi sommato al thermal clothing insulation precedentemente determinato il valore di 0.03 clo e 0.04 clo per uomini e donne rispettivamente.

E' stata infine considerata una maggiorazione del clothing insulation per intervistati seduti e con clothing ensembles with standing insulation values between 0.5 clo and 1.2 clo [16]. In dettaglio, tale maggiorazione è stata di 0.01 clo qualora l'intervistato fosse seduto su una wooden stool, tipologia di sedia presente in corrispondenza di alcuni porticati del campus universitario.

1.4. Study area

Le field surveys hanno avuto luogo in due differenti siti a Roma (41°55' N, 12°29' E, 20 m sul livello del mare), la città più popolosa e più estesa d'Italia rispettivamente con 2,844,821 abitanti e con 1,285.30 km² [86]. Il suo clima (Fig. 1.2) è tipicamente mediterraneo e caratterizzato da temperature massime medie sempre superiori a 10 °C e, in particolare, superiori a 31 °C in Luglio ed Agosto. Tale tipologia di clima è mite e confortevole nei periodi primaverili ed autunnali e vede temperature medie mensili inferiori a 10 °C solamente per il periodo invernale (Dicembre, Gennaio, Febbraio). L'inverno e l'inizio della primavera sono i periodi più piovosi e le precipitazioni medie annuali raggiungono il valore di 800 mm circa. La velocità del vento assume poi il valore medio annuale di 4.4 m/s ad un'altezza di 10 m sul livello del terreno. E' inoltre interessante notare come i valori medi dell'umidità relativa siano compresi per l'intero anno tra il 70% e l'80%.

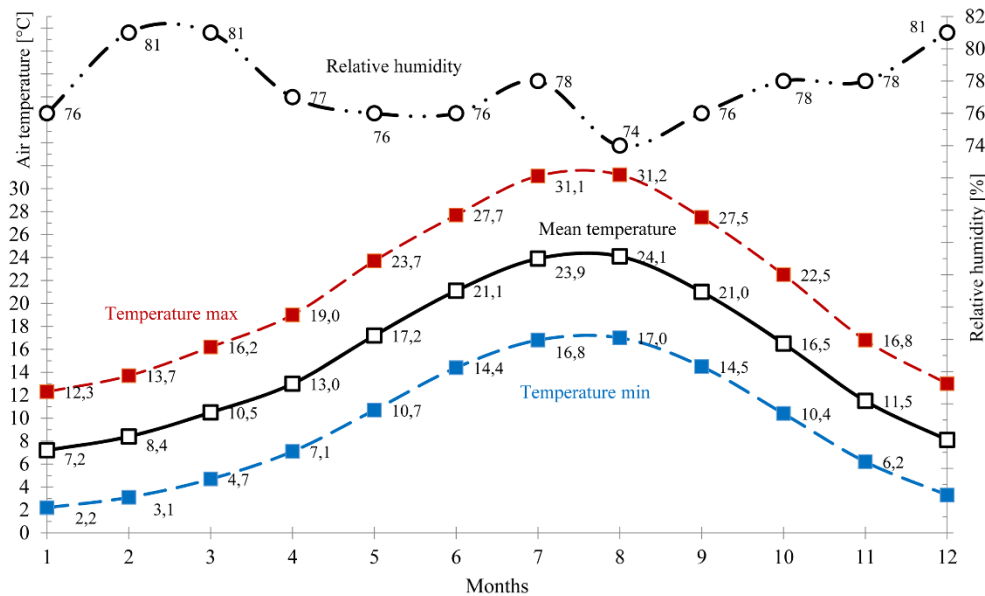


Figura 1.2. Temperature and relative humidity in Rome.

In base alla classificazione di Köppen-Geiger, tale clima rientra nella categoria Csa [24] (Tab. 1.3).

Tabella 1.3. Descrizione dei simboli della classificazione dei climi di Köppen-Geiger e criteri di definizione (per la categoria C, rappresentativa di climi temperati).

C		Temperate	$T_{HOT} > 10$ and $0 < T_{COLD} < 18$
	s	Dry summer	$P_{SDRY} < 40$ and $P_{SDRY} < P_{WWET}/3$
	w	Dry winter	$P_{WDRY} < P_{SWET}/10$
	f	Without dry season	Not (Cs) or (Cw)
	a	Hot summer	$T_{HOT} \geq 22$
	b	Warm summer	Not (a) and $T_{MON10} \geq 4$
	c	Cold summer	Not (a or b) and $1 \leq T_{MON10} < 4$

I siti presi in esame per la ricerca sono le aree esterne del campus dell'Università degli Studi di Roma "Sapienza" e della sede distaccata della Facoltà di Ingegneria (Fig. 2). Essi sono stati scelti per coprire un'ampia varietà di condizioni ambientali in termini di clima regionale, caratteristiche topografiche e morfologia urbana e, con riferimento allo stesso sito, sono state scelte aree caratterizzate da differenti condizioni micrometeorologiche.



Figura 1.3 A-F. Siti di misura nella città di Roma.

A testimonianza di quanto detto, nelle aree esterne del campus è possibile trovare un ampio parcheggio con ground coverage in asfalto (Fig. 1.3B), un giardino con alberi (Fig. 1.3C), un piazzale con una vasta fontana (Fig. 1.3D) e tipici canyon urbani (Figs. 1.3E-1.3F). La situazione è invece differente per la Facoltà di Ingegneria: in questo sito la ricerca è stata effettuata solo all'interno del chiostro storico che caratterizza la struttura (Fig. 1.3A). Esso è caratterizzato da un porticato con piastrelle di ceramica e da un cortile con ciottoli; lo sky view factor varia tra 0.20 e 0.60, valori riconducibili alla Local Climate Zone LCZ 2₃ [87]. Questa classificazione è basata sull'esame del circostante ambiente urbano e può essere estesa anche all'altro sito.

I fruitori di questi spazi sono soliti essere di passaggio e camminare, soggiornare per incontrare amici, studiare, mangiare e rilassarsi.

1.5. Thermal comfort indices

Nell'ambito del presente studio intervengono differenti indici di comfort termico. Alcuni di questi indici sono stati usati per procedere alla valutazione delle prestazioni del MOCI e del GOCI. Alcuni figurano come variabili indipendenti nelle relazioni empiriche ottenute a valle di differenti field surveys. In particolare, la Physiological Equivalent Temperature (PET) [21] è stata usata anche per calcolare i corrispondenti valori di neutralità e preferenza termica, così come il comfort range.

Essa è definita come “equivalent to the air temperature that is required to reproduce in a standardized indoor setting and for a standardised person the core and skin temperatures that are observed under the conditions being assessed” [21]. Esso assume un thermal clothing insulation di 0.9 clo ed un metabolic rate pari alla somma di 80 W (valore rappresentativo di un'attività leggera) più il metabolismo basale. Considera inoltre la temperatura media radiante MRT uguale alla temperatura dell'aria T_A , la velocità dell'aria WS uguale a 0.1 m/s e fissa la water vapour pressure a 12 hPa (valore corrispondente ad un'umidità relativa RH del 50% per $T_A=20$ °C). Esso si basa sull'equazione di bilancio termico introdotta con il Munich Energy Balance Model for Individual (MEMI) [88] (Eq. (10)):

$$M + W + R + C + E_D + E_{Re} + E_{Sw} + S = 0 \quad (10)$$

dove M is the metabolic rate, W is the physical work output, R is the net radiation of the body, C is the convective heat flow, E_D represents the imperceptible perspiration, E_{Re} is the sum of heat flows per riscaldare ed umidificare l'aria inspirata, E_{Sw} is the heat flow related to the evaporation of sweat and S is the storage heat flow for heating or cooling the body mass. Il calcolo della PET prevede infatti due diversi steps. Il primo riguarda la valutazione delle condizioni termiche del corpo umano mediante l'Eq. (10) per una data combinazione di variabili micrometeorologiche. Il secondo conduce invece ad inserire i valori calcolati per la mean skin and core temperature nel MEMI e risolvere l'equazione di bilancio termico per la temperatura dell'aria T_A (impostando, per le altre variabili micrometeorologiche, i valori precedentemente introdotti).

Il Predicted Mean Vote (PMV) [14] è invece il secondo indice più usato per valutare l'outdoor thermal perception. Esso è uno dei primi indici introdotti e fu inizialmente sviluppato per applicazioni in ambienti interni attraverso i risultati di questionari somministrati a 1,565 individui. Lo scopo originario era fornire agli air-conditioning engineers uno strumento in grado di aiutarli nella creazione di ambienti confortevoli. Solo qualche anno dopo Jendritzky and Nübler [17] hanno seguito un approccio noto con il nome di “Klima Michel Model” per adattare il PMV alle più complesse condizioni radiative dell'ambiente esterno. Esso si basa sull'Eq. (11):

$$PMV = (0.303 \cdot e^{-0.036M} + 0.028) \cdot S \quad (11)$$

dove M rappresenta il metabolic rate e S è un termine connesso al bilancio termico del corpo umano. Questo indice, per il cui calcolo occorrono due variabili operative (metabolic rate M e thermal clothing insulation I_{CL}) e quattro variabili ambientali (temperatura dell'aria T_A , temperature media radiante MRT, umidità relativa RH e velocità del vento WS), si basa sull'ASHRAE 7-point scale (cold (-3), cool (-2), slightly cool (-1), neutral (0), slightly warm (+1), warm (+2) and hot (+3)).

Un altro indice valutato in questa ricerca è l'Effective Temperature (ET) [46]. Essa fu originariamente introdotta da Houghten and Yaglou [89] nel 1923 mentre la sua formulazione matematica fu definita nel 1933 da Missenard [46] (Eq. (12)):

$$ET = 37 - \frac{37 - T_A}{0.68 - 0.0014 \cdot RH + \frac{1}{1.76 + 1.4 \cdot WS^{0.75}}} - 0.29 \cdot T_A \cdot (1 - 0.01 \cdot RH) \quad (12)$$

Essa permette di ottenere la temperatura effettiva sentita dall'organismo umano per dati valori di temperatura dell'aria, umidità relativa e velocità del vento considerando normale pressione atmosferica ed una body temperature di 37 °C. L'Effective Temperature è stata inserita in questo studio in quanto è largamente usata in numerosi paesi (Germania, Polonia, Russia, etc.) [11]: ad esempio tale indice in Germania è usato per programmare i medical check-ups per lavoratori esposti ad intense sollecitazioni termiche mentre ad Hong Kong è usato dal weather service come elemento di monitoraggio.

Le prestazioni del MOCI sono inoltre comparate a quelle dell'Actual Sensation Vote Europe (ASV_{EUROPE}) (Eq. (13)) [25]:

$$ASV_{EUROPE} = 0.049 \cdot T_A + 0.001 \cdot I_G - 0.051 \cdot WS + 0.014 \cdot RH - 2.079 \quad (13)$$

Esso è stato sviluppato combinando dei modelli creati per 7 differenti città europee (Atene, Cambridge, Fribourg, Kassel, Milano, Sheffield e Thessaloniki) durante il progetto RUROS (Rediscovering the Urban Realm and Open Spaces) [25]. In ognuna di queste città i risultati di differenti field survey sono stati relazionati a contemporanee misure micrometeorologiche ottenendo semplici modelli lineari dove temperatura dell'aria, irradiazione globale, wind speed ed umidità relativa erano le variabili indipendenti (con Pearson coefficients compresi tra 0.27 e 0.68).

L'inserimento di tale indice all'interno dello studio è motivato dal fatto che l' ASV_{EUROPE} può essere considerato uno dei primi indici empirici ottenuti a partire da field surveys effettuate in città differenti.

Viene descritto infine il modello alla base della (rational) Standard Effective Temperature (SET*) [18], che figura come variabile indipendente in alcune delle relazioni empiriche ricavate a seguito di campagne sperimentali sul campo. Essa è definita come "the equivalent temperature of an isothermal environment at 50% RH in which a subject, while wearing clothing standardized for the activity concerned, would have the same heat stress and thermoregulatory strain as in the actual test environment" [18][66]. L'ambiente isoterma fa riferimento ad un ambiente collocato al livello del mare in cui la temperatura media radiante MRT e quella dell'aria T_A assumono lo stesso valore e la velocità dell'aria è zero. Il suo calcolo viene effettuato in accordo con l'Eq. (14) [18][66]:

$$SET^* = (wh_{s,e}(p_{s,sk} - 0.5p_{SET^*}) + h_s T_{SK} - H_{SK})/h_s \quad (14)$$

dove w is the fraction of the wetted skin surface, $h_{s,e}$ is the standard evaporative heat transfer coefficient, $p_{s,sk}$ is the water vapor pressure on the skin, p_{SET^*} is the saturated water vapor pressure at SET^* , h_s is the standard heat transfer coefficient, T_{SK} is the skin temperature and H_{SK} is the heat loss from the skin.

1.6. Risultati e discussioni

1.6.1. Valori neutrali di PET e temperatura dell'aria

I livelli di adattamento a determinate condizioni ambientali sono stabiliti come una funzione dell'esposizione passata ed influenzano in maniera determinante come un ambiente termico è percepito. La temperatura alla quale le persone giudicano l'ambiente confortevole è vicina a ciò che loro hanno vissuto e, per questa ragione, viene studiata la temperatura neutrale nella stagione calda ed in quella fredda. Essa è definita come quella temperatura alla quale le persone non sentono né caldo né freddo [27][63] e coincide con la sensazione termica centrale ($TSV=0$) nell'ASHRAE 7-point scale.

Conseguentemente sono stati calcolati e graficati (Fig. 1.4) i mean thermal sensation votes (MTSVs) degli intervistati in ogni intervallo di temperatura con una larghezza dei bins di 1°C PET e sono state determinate le linee di regressione tra MTSV e PET nella stagione calda e fredda:

$$\text{Hot season:} \quad MTSV = -4.575 + 0.170 \cdot PET \quad R^2 = 0.847 \quad (15)$$

$$\text{Cool season:} \quad MTSV = -2.941 + 0.118 \cdot PET \quad R^2 = 0.949 \quad (16)$$

Sostituendo $MTSV=0$ nelle Equazioni (15) e (16) si ottengono i valori delle PET neutrali: 26.9 e 24.9 °C per la stagione calda e fredda rispettivamente.

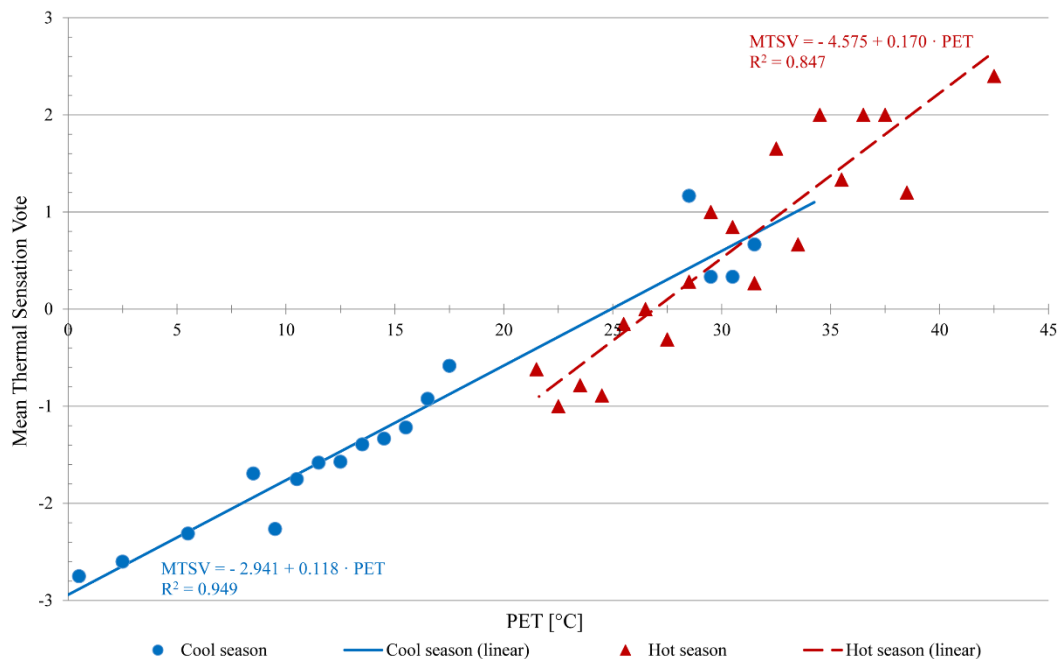


Figura 1.4. Correlazione tra i mean thermal sensation votes (MTSVs) e la PET nella stagione calda e fredda.

Questi risultati dimostrano l'influenza di un moderato effetto di adattamento stagionale e la PET neutrale più elevata durante la stagione calda è una conseguenza delle caratteristiche climatiche della città di Roma. Essa è caratterizzata da un clima mediterraneo e fa riferimento alla categoria Csa della classificazione dei climi di Köppen-Geiger [56]: l'estate è calda, la temperatura media del mese più caldo è maggiore di 22°C e, durante l'anno, raramente sono registrate temperature basse. Ciò potrebbe giustificare la maggiore tolleranza delle persone verso alte temperature.

Risulta quindi necessario effettuare un confronto con quanto trovato in altri studi (Tab. 1.4).

Tabella 1.4. Risultati di altri studi revisionati in termini di neutral PET, neutral air temperature e neutral operative temperature.

City	Neutral PET [°C]		Neutral air temperature [°C]		Neutral operative temperature [°C]
	Summer	Winter	Summer	Winter	Whole year
Taichung City, Taiwan [27]	25.6	23.7	-	-	-
Cairo, Egypt [28]	27.4	26.5	-	-	-
Hong Kong, China [29]	25	21	-	-	-
Damascus, Syria [31]	15.8	23.4	-	-	-
Sydney, Australia [30]	22.9	28.8	-	-	-
Athens, Greece [25]	-	-	28.5	21.5	-
Thessaloniki, Greece [25]	-	-	28.9	15.0	-
Fribourg, Switzerland [25]	-	-	15.8	11.9	-
Milan, Italy [25]	-	-	21.5	21.1	-
Cambridge, UK [25]	-	-	18.0	n.a.	-
Sheffield, UK [25]	-	-	15.8	10.8	-
Kassel, Germany [25]	-	-	22.1	15.2	-
Singapore, Singapore [78]	-	-	-	-	28.7
Rome, Italy (present study)	26.9	24.9	27.2	22.1	-

Risultati simili sono stati riscontrati da Lin [27] attraverso uno studio condotto a Taichung City, Taiwan. In questo caso le PET neutrali per le stagioni calda e fredda sono 25.6 e 23.7 °C rispettiva-

mente e quindi circa $1.2 \div 1.3$ °C inferiori a quelle ottenute per Roma. Questa somiglianza tra i valori può essere parzialmente giustificata dal fatto che Taichung City appartiene alla categoria Cwa della classificazione dei climi di Köppen [24] ed è anch'essa caratterizzata da una temperatura media del mese più caldo superiore a 22 °C. E' necessario anche considerare che questa città è nella parte settentrionale dell'isola di Taiwan ed il suo clima non ha le caratteristiche tropicali delle città della parte meridionale.

Valori delle PET neutrali leggermente superiori sono stati poi riscontrati per la città del Cairo, Egitto [28]. In questo caso infatti la PET neutrale assume il valore di 26.5 °C in inverno e di 27.4 °C in estate. E' necessario però considerare che questi valori sono stati calcolati come i valori medi delle PET neutrali in nove punti di misura all'interno di un parco mentre, nella field survey effettuata a Roma, sono stati valutati contesti urbani con varie caratteristiche. I fenomeni evapotraspirativi e la diminuzione di temperatura media radiante e temperatura dell'aria nel parco hanno attenuato quindi le elevate temperature medie della città egiziana, che in estate sono 5 °C superiori a quelle di Roma. Per questa ragione, la differenza tra i valori rilevati nelle due città è forse inferiore a quella che potremmo avere considerando gli stessi siti urbani.

La scelta del sito ha probabilmente influenzato anche i risultati derivanti dallo studio condotto da Cheng et al. ad Hong Kong [29]. In questo caso infatti la campagna longitudinale ha avuto luogo in una piazza aperta con caratteristiche simili a quelle di un parco urbano e questo ha condotto ad una PET neutrale di 25 °C in estate e di 21 °C in inverno. L'influenza della scelta del sito sull'outdoor thermal comfort emerge in particolare considerando che la temperatura media dell'aria ad Hong Kong è generalmente superiore a quella di Roma: questa differenza è di circa 4-5 °C in estate e di circa 8 °C in inverno.

Risultati differenti sono stati invece ottenuti da Yahia and Johansson [31] e da Spagnolo and de Dear [30]. Essi hanno infatti mostrato come, per Damasco e Sydney rispettivamente, le PET neutrali hanno un trend opposto: in inverno sono stati ottenuti i valori di 23.4 e 28.8 °C mentre in estate 15.8 e 22.9 °C. Anche se può sembrare sorprendente che le PET neutrali in estate siano più basse che in inverno, essi spiegano il fenomeno applicando il concetto di alliesthesia. Esso è un meccanismo psicologico che porta le persone a giudicare come piacevole ogni cosa che fa sentire loro più fresco in una situazione di caldo e viceversa.

Tuttavia, è necessario considerare che in non tutti gli studi queste valutazioni sono state effettuate attraverso la PET. Ad esempio, Nikolopoulou and Lykoudis [25] hanno riportato i risultati di uno studio trasversale in sette città europee dove è stata analizzata la temperatura dell'aria neutrale.

Per fare quindi un confronto più ampio, essa è stata valutata anche in questa ricerca seguendo l'approccio descritto all'inizio di questa sottosezione e considerando air temperature bins con un'ampiezza di 1 °C. Ciò ha permesso di determinare, per la città di Roma, una temperatura neutrale dell'aria di 22.1 °C in inverno e di 27.2 °C in estate.

Esaminando questi risultati e confrontandoli con quelli di Athens, Thessaloniki, Fribourg, Milan, Cambridge, Sheffield e Kassel, è possibile dire che, anche per la città di Roma, le temperature neutrali sembrano seguire il profilo climatico del luogo su una base stagionale. Inoltre, in accordo con quanto riportato da Nikolopoulou and Lykoudis [25], anche in questo studio la differenza tra le

temperature neutrali e le temperature medie stagionali diminuisce in estate ed è più alta in inverno; viene confermata la tendenza di questa differenza ad essere inversamente proporzionale alla temperatura media dell'aria delle città. Questo trova una spiegazione fisica nel fatto che le persone, grazie ai loro meccanismi di autoregolazione, riescono ad adattarsi più velocemente a condizioni calde che a condizioni fredde [25].

Infine, un approccio differente è stato adottato da Yang et al. [78] a Singapore: essi hanno valutato la temperatura operativa, determinando il suo valore neutrale in 28.7 °C. Tuttavia, questa variabile non è stata analizzata nel presente studio e per questa ragione non è possibile effettuare alcun confronto.

1.6.2. Valori preferiti della PET

Anche se analizzata in un numero limitato di studi, è interessante valutare la PET preferita. Essa può essere definita come la condizione ambientale termica nella quale gli individui non preferiscono né temperature più calde, né temperature più fredde [47]: può essere considerata la temperatura che le persone attivamente preferiscono e la sua analisi permette di studiare gli effetti delle aspettative stagionali sul thermal comfort.

Quindi, per la sua determinazione nella stagione calda e nella stagione fredda, questo studio considera le preferenze termiche degli intervistati date come risposta ai questionari utilizzando la McIntyre scale (cooler (-1), no change (0) and warmer (+1)). Le diverse preferenze sono state valutate in corrispondenza di bins con una larghezza di 1°C PET e sono state correlate alla PET stessa, usando un logistic curve model con la funzione probit [63]. Il valore della PET, in corrispondenza del quale le curve “prefer warmer” e “prefer cooler” relative ad ogni stagione si intersecano, sarà quello rappresentativo della PET preferita [27].

Esaminando la Fig. 1.5, è possibile notare come le PET preferite differiscono per le due stagioni: i valori in the hot and cool seasons sono 24.8 °C e 22.5 °C, 2.1 °C e 2.4 °C inferiori alle PET neutrali, rispettivamente.

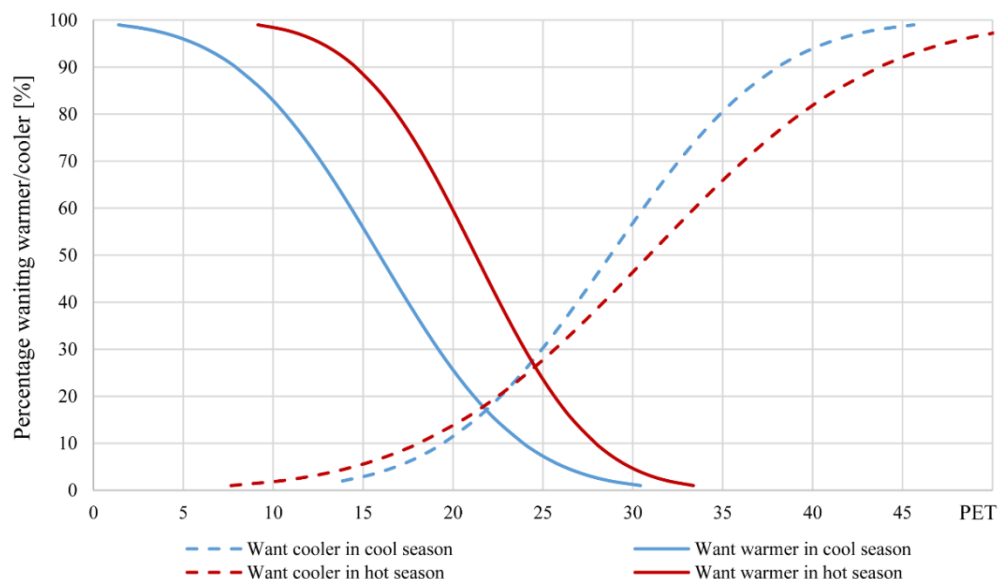


Figura 1.5. Preferred PETs in the cool and hot seasons.

Ciò conferma, per la città di Roma, la presenza di una sorta di adattamento termico attraverso le differenti stagioni.

Come fatto in precedenza, i risultati ottenuti vengono confrontati con quelli di altri studi (Tab. 1.5).

Tabella 1.5. Risultati di altri studi revisionati in termini di preferred PET.

City	Preferred PET [°C]		Preferred operative temperature [°C]
	Summer	Winter	Whole year
Taichung City, Taiwan [27]	24.5	23.0	-
Sydney, Australia [30]	23.4	30.9	-
Singapore, Singapore [78]	-	-	26.5
Rome, Italy (present study)	24.8	22.5	-

Una situazione simile è stata riscontrata da Lin [27] a Taichung City, Taiwan. Le PET preferite assumono i valori di 23 °C per la stagione fredda e di 24.5 °C per la stagione calda e, anche in questo caso, è registrato un decremento rispetto alle PET neutrali.

Anche se in termini di temperatura operativa, un decremento del valore preferito è stato riscontrato anche a Singapore [78]: in questo caso tale decremento è di 2.2 °C e la temperatura operativa preferita assume il valore di 26.5 °C.

Infine, Spagnolo and de Dear [30] hanno trovato per la città di Sydney una PET preferita di 30.9 °C per la stagione fredda e di 23.4 °C per la stagione calda. Come occorso anche per le PET neutrali, in questo studio è il valore relativo alla stagione fredda che è più alto e, se negli altri studi revisionati le PET preferite (o da un punto di vista più generale i valori preferiti delle variabili) registravano un decremento rispetto ai valori neutrali, in questo studio accade il contrario evidenziando l'influenza del meccanismo dell'alliesthesia.

1.6.3. "Optimal" comfort ranges

L'influenza dell'acclimatamento e delle aspettative personali emerge considerando anche i ranges di PET corrispondenti ad ambienti termici soddisfacenti.

Le risposte date dagli intervistati sulla percezione termica sono state quindi messe in relazione ai corrispondenti valori della PET e sono stati considerati bins di ampiezza pari ad 1°C PET. Per ogni bin sono stati determinati i mean thermal sensation votes (MTSVs) e, differentemente da quanto fatto nelle sottosezioni 1.6.1 e 1.6.2, le risposte degli intervistati non sono state divise in funzione delle stagioni.

Da questa analisi è stata ricavata mediante una regressione lineare la seguente equazione:

$$MTSV = -3.115 + 0.124 \cdot PET \quad R^2 = 0.941 \quad (17)$$

Il suo andamento è stato graficato in Fig. 1.6 e proprio grazie all'Eq. 17 è stato ricavato il comfort range per la città di Roma in termini di PET. Esso è compreso tra una temperatura di 21.1 °C ed una temperatura di 29.2 °C (Tab. 1.6); la sua determinazione si basa sull'assunzione che il comfort

range dovrebbe corrispondere all'intervallo $-0.5 \div 0.5$ dell'ASHRAE 7-point scale (la stessa che è stata utilizzata in questo studio)[34][59].

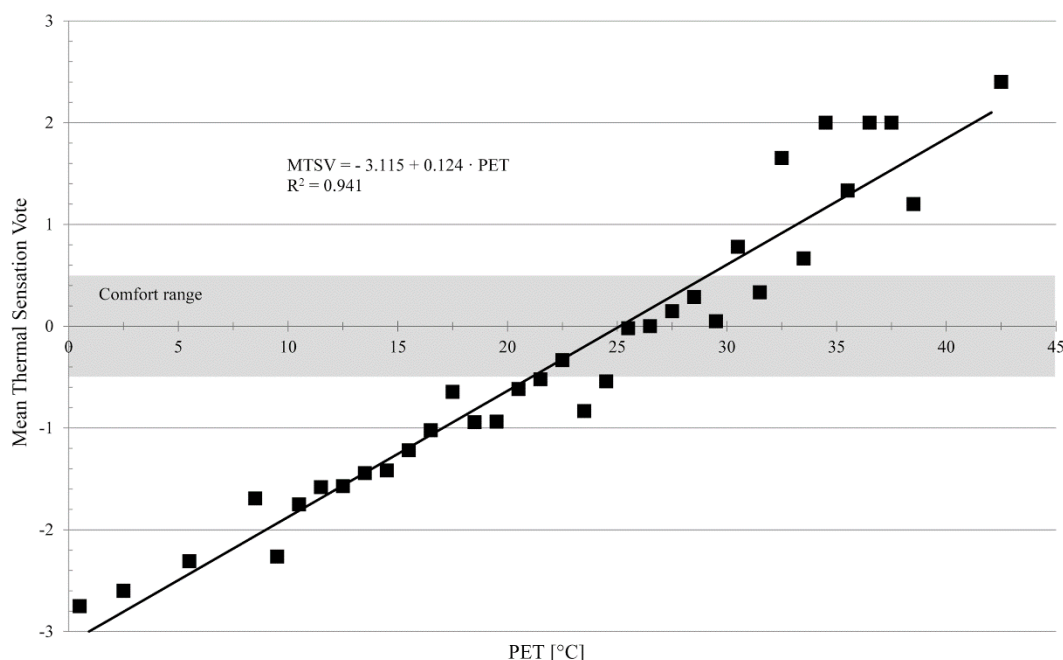


Figura 1.6. Correlation between the mean thermal sensation votes (MTSVs) and PET during a whole year and identification of the PET comfort range.

Tabella 1.6. Risultati di altri studi revisionati in termini di PET e operative temperature comfort ranges.

City	PET comfort range [°C]				Operative temperature comfort range [°C]
	Summer	Winter	Transient seasons	Whole year	Whole year
Glasgow, Scotland [59]	-	-	-	9÷18	-
Western/Middle Europe [35]	-	-	-	18÷23	-
Cairo, Egypt [28]	22÷30	21÷29	-	-	-
Damascus, Syria [31]	n.a.÷31	21÷n.a.	-	-	-
Sun Moon Lake, Taiwan [35]	-	-	-	26÷30	-
Taichung City, Taiwan [27]	-	-	-	21.3÷28.5	-
Hong Kong, China [29]	n.a.÷32	12÷n.a.	-	-	-
Szeged, Hungary [34]	-	-	13.7÷20.3	-	-
Lisbon, Portugal [81]	-	-	-	21÷23	-
Hong Kong, China [90]	27÷29	14÷16	-	-	-
Singapore, Singapore [78]	-	-	-	-	26.3÷31.7
Rome, Italy (present study)	-	-	-	21.1÷29.2	-

Il confronto con risultati di altri studi (Tab. 1.6), a causa delle assunzioni fatte, è possibile solo con i risultati di Krüger et al. [59] per Glasgow, Scotland, che hanno ottenuto, in termini di PET, il comfort range $9 \div 18$ °C. Anch'essi hanno valutato la percezione termica mediante l'ASHRAE 7-point scale ed hanno considerato il comfort range compreso tra le sensazioni termiche -0.5 e 0.5 , ottenendo risultati validi per l'intero anno. Dal confronto emerge che non vi è sovrapposizione tra questo comfort range e quello di Roma: la causa può essere trovata nelle differenze tra i climi delle due città. Glasgow ha infatti una temperatura dell'aria media annuale di 8.9 °C mentre Roma di 15.2 °C. E'

anche interessante notare che, solo per il caso di Roma, vi è un parziale accordo con il PET comfort range proposto per l'Europa centro-occidentale, che è $18 \div 23$ °C [35]. Questo risultato sottolinea come persone di differenti regioni abbiano esigenze termiche diverse.

Da questo punto di vista, i risultati della presente ricerca trovano un buon accordo con quelli ottenuti da Mahmoud [28] per il Cairo, Egypt, e da Yahia and Johansson [31] per Damasco, Siria. E' necessario tuttavia considerare che nel primo caso sono stati valutati separatamente inverno ed estate ed i valori ottenuti possono essere influenzati dall'area di studio scelta (che è un parco urbano). Nel secondo caso invece sono stati determinati due differenti PET comfort range: uno considera come limite il 90% di accettabilità termica, mentre l'altro l'80%. Per la città di Roma, invece, il valore più alto di accettabilità termica è dell'85% ed è stato rilevato in corrispondenza di un MTSV=0.

Questo fattore influenza anche il confronto con i risultati di altri studi revisionati. Ad esempio, Matzarakis and Lin [35] hanno determinato il PET comfort range per Sun Moon Lake, Taiwan, considerando come limite l'88% di accettabilità termica, mentre lo stesso Lin [27], nel suo studio condotto a Taichung City, Taiwan, ha invece considerato come limite il 90%. Queste assunzioni rendono difficile un confronto con i risultati del presente studio, dove non vengono mai raggiunti i limiti imposti negli studi svolti a Taiwan.

Risulta difficile effettuare anche un confronto con i risultati di Cheng et al. [29] perché essi hanno determinato il comfort range considerando l'intervallo compreso tra le sensazioni termiche -1 e +1.

La situazione è invece differente per lo studio di Kantor et al. [34]: anche se hanno considerato, come fatto per la città di Roma, il comfort range compreso tra le sensazioni termiche -0.5 e +0.5, essi lo hanno analizzato con riferimento ad autunno e primavera.

Un altro tipo di analisi rispetto a quella effettuata per Roma è stata poi svolta da Andrade et al. [81] e da Ng and Cheng [90]: per definire i comfort ranges essi hanno rispettivamente individuato quei valori di PET in corrispondenza dei quali era più alto il numero di voti "want no change of temperature" e TSV=0.

Una differente metodologia è stata poi usata da Yang et al. [78]: in questo caso il comfort range è stato valutato in termini di temperatura operativa e considerando un 80% di accettabilità termica. Queste due assunzioni rendono tuttavia difficile effettuare un confronto con i valori ottenuti attraverso questa ricerca.

1.6.4. Verso il nuovo Mediterranean Outdoor Comfort Index (MOCI)

Nella valutazione del comportamento termico degli spazi aperti e dell'outdoor thermal comfort, è necessario considerare l'influenza dell'adattamento e delle aspettative personali; individui provenienti da differenti regioni presentano esigenze diverse dal punto di vista termico. Va inoltre considerato il fatto che molti indici razionali, comunemente adoperati per la valutazione dell'outdoor thermal comfort, sono stati sviluppati per ambienti indoor e solo successivamente adattati a quelli esterni. Per questa ragione, uno degli obiettivi della presente ricerca è la creazione di un indice empirico in grado di valutare la percezione termica della popolazione mediterranea e denominato MOCI (Mediterranean Outdoor Comfort Index).

In una prima fase, esso è stato determinato attraverso una regressione multipla considerando come variabile dipendente il voto dato dagli intervistati nel giudicare l'ambiente termico e come variabili indipendenti le variabili ambientali (temperatura media radiante, temperatura dell'aria, umidità relativa, irradiazione globale, velocità del vento), le variabili operative (metabolic rate, isolamento termico del vestiario) ed alcuni fattori personali (età, tempo di esposizione).

Queste variabili indipendenti sono state tuttavia ridotte attraverso l'analisi del VIF (Variance Inflationary Factor) e della multicollinearità: le variabili collineari infatti non forniscono informazioni aggiuntive ed è difficile individuare l'effetto che ciascuna di esse ha sulla variabile dipendente. Per tale ragione, in accordo con quanto suggerito da Marquardt [91] e con quanto fatto da Eliasson et al. [92], dovrebbero essere eliminate quelle variabili indipendenti con $VIF > 10$.

Da questo punto di vista sono state tuttavia fatte scelte che devono essere giustificate. Da un'analisi preliminare del VIF, le variabili che inizialmente avevano $VIF > 10$ erano l'età, la temperatura media radiante e la temperatura dell'aria. Si è però ipotizzato che l'elevato valore del VIF di temperatura media radiante e temperatura dell'aria possa avere un legame con l'irradiazione globale (caratterizzato da un VIF prossimo a 10); inoltre, se è vero che laddove si ha un elevato valore dell'irradiazione globale, si ha un elevato valore della temperatura media radiante, non è vero il contrario. E' infatti possibile avere valori della temperatura media radiante elevati per cause diverse dalla direct shortwave radiation. Per tali ragioni e data l'importanza della temperatura dell'aria per l'outdoor thermal comfort, sono stati quindi eliminati l'età e l'irradiazione globale. E' stato poi calcolato nuovamente il VIF per le rimanenti variabili pervenendo a risultati soddisfacenti ($VIF < 10$ per tutte le variabili considerate).

Nello step successivo, è stata effettuata una Best Subsets Analysis. Con questo approccio sono stati valutati, attraverso differenti criteri, i 127 possibili modelli di regressione, dato l'insieme di variabili indipendenti precedentemente determinato.

Il primo criterio utilizzabile è quello dell' R^2 corretto: in questo caso l' R^2 viene corretto tenendo conto del numero di variabili esplicative inserite nel modello e dell'ampiezza del campione. Risulta utile ricorrere a tale misura dal momento che vengono confrontati modelli aventi un diverso numero di variabili esplicative.

Un secondo criterio spesso utilizzato per confrontare diversi modelli di regressione si basa sulla statistica C_p . Questa statistica misura la differenza tra il modello di regressione stimato e il modello vero. Essa è definita come segue:

$$C_p = \frac{(1-R_p^2)(n-T)}{1-R_T^2} - [n - 2(p + 1)] \quad (18)$$

dove:

- p è il numero di variabili esplicative inserite nel modello di regressione;
- T è il numero totale di parametri (inclusa l'intercetta) da stimare nel modello di regressione completo;
- n è il numero di osservazioni;

- R_p^2 è il coefficiente di regressione multipla per un modello di regressione contenente p variabili esplicative;
- R_T^2 è il coefficiente di regressione multipla per il modello di regressione completo.

Se un modello di regressione con p variabili esplicative differisce dal modello vero solo per gli errori casuali, il valore medio della statistica C_p è $(p+1)$. Pertanto, si tratta di individuare quei modelli con un valore di C_p minore o uguale a $p+1$.

In questo studio, tra i vari modelli che soddisfano la condizione $C_p \leq (p+1)$, quello che ha il valore più elevato dell' R^2 corretto è il modello che annovera tra le variabili velocità del vento, temperatura dell'aria, temperatura media radiante, umidità relativa ed isolamento termico del vestiario.

Esso risulta infatti avere un valore dell' R^2 corretto pari a 0.395. Il valore dell' R^2 è poi 0.398 mentre il Pearson coefficient r è 0.631.

Lo step successivo ha riguardato quindi lo sviluppo del modello di regressione multipla (Tab. 1.7).

Tabella 1.7. Analisi statistica relative al modello più performante in base alla Best Subset Analysis.

	Coefficient	Standard error	t-statistic	Sig.	VIF
Intercept	-4.068	0.439	-9.268	0.000	-
Clothing insulation	0.264	0.158	1.672	0.095	2.064
Mean radiant temperature	0.083	0.009	9.023	0.000	4.271
Air temperature	0.058	0.015	3.843	0.000	6.498
Relative humidity	0.005	0.004	1.284	0.199	2.057
Wind speed	-0.272	0.079	-3.445	0.001	1.111

Tenendo conto dei coefficienti riportati, è stata ricavata la relazione del nuovo indice empirico proposto, il MOCI (Mediterranean Outdoor Comfort Index), che risulta essere:

$$MOCI = -4.068 - 0.272 \cdot WS + 0.005 \cdot RH + 0.083 \cdot T_{MR} + 0.058 \cdot T_A + 0.264 \cdot I_{CL} \quad (19)$$

Il valore dell'intercetta, pari a -4.068, rappresenta il valore dell'indice che si avrebbe qualora le variabili incluse nel modello avessero valore pari a zero. Tale valore sarebbe quindi rappresentativo di una sensazione termica di freddo intenso. Occorre tuttavia considerare la validità di tale affermazione in relazione ai ranges misurati per le variabili indipendenti: ad esempio non è mai stato osservato un valore di I_{CL} pari a 0 (esso rappresenta infatti la condizione di un uomo nudo).

L'inclinazione di ogni variabile fornisce invece informazioni sulla variazione del MOCI a seguito della variazione unitaria di ognuna di esse (mantenendo costanti i valori delle altre). Per esempio, un aumento di 1 °C della temperatura media radiante porta ad un aumento dell'indice di 0.083, sempre considerando l'assunzione di tenere costanti le altre variabili. In questo caso, la scelta di adoperare un modello di regressione lineare è dovuta al fatto che i residui non mostrano un andamento strutturato ed il valore del test F (123,567) conferma la presenza di una relazione significativa tra la variabile dipendente e l'insieme delle variabili esplicative. Tale valore è infatti più alto di 2.21, valore critico per una distribuzione F con 5 e 1,564 gradi di libertà determinato dalla tabella relativa al 95° percentile della pdf di Fischer e considerando un livello di significatività di 0.05.

Risulta interessante valutare se vi è una relazione lineare significativa tra le variabili indipendenti ed il nuovo indice proposto. Affinché ciò avvenga, i valori assunti dalla statistica t devono essere fuori dal range ± 1.960 , che deriva dalla tabella dei percentili $(1 - \alpha) \%$ della pdf di Student assumendo un livello di significatività pari a 0.05 e 1,564 gradi di libertà. Esaminando la Tab. 1.7, è quindi possibile vedere come vi sia una relazione lineare significativa tra il MOCI e la temperatura media radiante, la temperatura dell'aria e la velocità del vento.

E' stato valutato anche il contributo di ciascuna variabile indipendente. Per questo tipo di analisi viene usato il criterio del test F parziale: esso valuta il contributo che ciascuna variabile indipendente fornisce alla somma dei quadrati dopo che tutte le altre sono state incluse nel modello. In presenza di più di una variabile indipendente, il contributo di ciascuna può essere valutato mediante la somma dei quadrati della regressione per un modello che comprende tutte le variabili esplicative eccetto quella presa in considerazione, SQR (tutte le variabili tranne la k-esima). Pertanto, il contributo della variabile k, supponendo che tutte le altre variabili siano incluse nel modello, può essere valutato sulla base della seguente quantità:

$$SQR(X_k | \text{tutte le variabili tranne la } k - \text{esima}) = SQR(\text{tutte le variabili inclusa la } k - \text{esima}) - SQR(\text{tutte le variabili esclusa la } k - \text{esima}) \quad (20)$$

Il test F parziale è poi dato dalla seguente espressione:

$$F = \frac{SQR(X_k | \text{tutte le variabili tranne la } k - \text{esima})}{MQE} \quad (21)$$

dove con F si indica la statistica F.

Tale valore viene confrontato con il valore critico ravvisabile nella tabella relativa al 95° percentile della pdf di Fischer. Esso risulta essere pari a 2.21.

Si procede quindi all'individuazione dei numeratori relativi alla formula del test F parziale. A tal proposito si hanno i seguenti valori:

- $SQR(T_A | T_{MR}, UR, V_A, I_{CL}) = 15.940$;
- $SQR(T_{MR} | T_A, UR, V_A, I_{CL}) = 89.795$;
- $SQR(V_A | T_A, UR, T_{MR}, I_{CL}) = 12.647$;
- $SQR(UR | T_A, V_A, T_{MR}, I_{CL}) = 1.424$;
- $SQR(I_{CL} | T_A, V_A, T_{MR}, UR) = 13.155$.

Di conseguenza i valori del test F parziale sono i seguenti:

- $T_A = 14.624$;
- $T_{MR} = 82.382$;
- $V_A = 11.603$;
- $UR = 1.307$;

$$- I_{CL} = 12.069.$$

Effettuando un confronto con il valore critico di 2.21, è possibile notare come i valori del test F parziale sono più alti nel caso della temperatura media radiante, della temperatura dell'aria, della velocità del vento e dell'isolamento termico del vestiario. Risulta essere invece inferiore il valore del test F parziale dell'umidità relativa.

Per tali ragioni il modello viene migliorato in maniera significativa dall'inserimento della temperatura media radiante, della temperatura dell'aria, della velocità del vento e dell'isolamento termico del vestiario (in ordine di contributo dato). Un miglioramento inferiore viene apportato dall'umidità relativa.

L'importanza della temperatura media radiante per il modello è sottolineata anche dal fatto che il corrispondente coefficiente di determinazione parziale assume il valore del 19%.

Questi risultati trovano una conferma in quelli di altri studi [93][94] che hanno evidenziato come la temperatura media radiante è la variabile che influenza maggiormente il bilancio energetico del corpo umano. Occorre considerare che tali risultati sono una conseguenza del clima poco ventoso di Roma: infatti, in quei climi caratterizzati da valori più alti della velocità del vento, la temperatura dell'aria diviene la variabile dominante in quanto strettamente legata agli scambi termici convettivi [21][10].

1.6.5. Correzione della relazione della Predicted Percentage of Dissatisfied (PPD)

Risulta necessario considerare che il MOCI (come il PMV) predice il valore medio dei voti termici di un largo gruppo di persone esposte ad un dato ambiente termico e, per questa ragione, potrebbe essere utile conoscere il numero di persone che avvertono discomfort termico sotto certe condizioni microclimatiche. Da questo punto di vista, l'ISO 7730 [45] propone l'uso della Predicted Percentage of Dissatisfied (PPD) per valutare la percentuale di persone termicamente insoddisfatte che avvertono troppo caldo o troppo freddo; essa può essere numericamente determinata dal PMV attraverso una regression equation. Tuttavia, il PMV è basato sulla stessa 7-point thermal sensation scale adottata per il MOCI e questo permette di valutare la bontà, in relazione al clima mediterraneo, della formula originale dalle PPD [45]. In accordo con quanto riportato nella tabella 2 dell'ISO 7730 [45], è assunto che il comfort termico corrisponde al range tra -1 (leggermente fresco) e +1 (leggermente caldo), mentre il discomfort è legato per il caldo ai voti +2 e +3 e per il freddo ai voti -2 e -3. In Fig. 1.7 vengono mostrati i punti rappresentativi dell'actual PPD (determinati tenendo conto dei risultati della field survey per ogni PET bin), la curva di best-fit per questi punti (PPD Rome), la curva della PPD determinata per la città di Glasgow (PPD Glasgow) [59] e la curva della PPD calcolata in accordo con l'ISO 7730 [45], mentre in Tab. 1.8 vengono riportate le equazioni di queste curve.

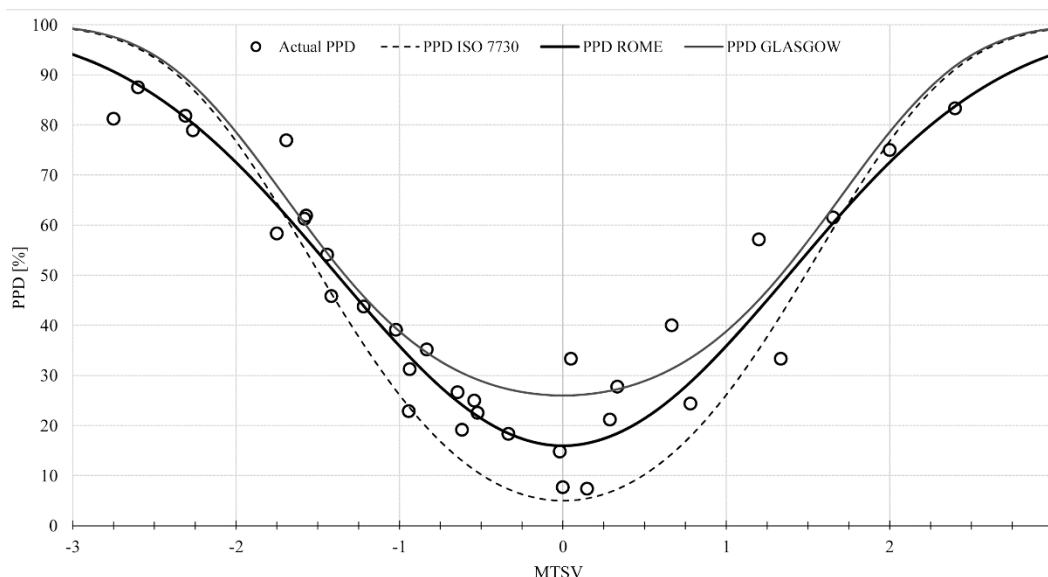


Figura 1.7. Analisi della Predicted Percentage of Dissatisfied (PPD).

Tabella 1.8. Equazioni relative alla PPD.

Original PPD equation [45]	$PPD=100-95 \cdot \text{EXP}(-0.03353 \cdot \text{MTSV}^4 - 0.2179 \cdot \text{MTSV}^2)$	-
PPD Glasgow [59]	$PPD=100-74 \cdot \text{EXP}(-0.04 \cdot \text{MTSV}^4 - 0.15 \cdot \text{MTSV}^2)$	$R^2=0.80$
PPD Rome [present study]	$PPD=100-84.02 \cdot \text{EXP}(-0.003173 \cdot \text{MOCI}^4 + 0.2668 \cdot \text{MOCI}^2)$	$R^2=0.87$

Esaminando la Fig. 6 è possibile notare come, in corrispondenza di una sensazione termica neutrale ($\text{MTSV}=0$), il valore minimo della PPD ottenuto in questo studio è al di sopra di quello derivante dalla PPD regression equation proposta nell'ISO 7730 [45]. Questo può essere spiegato dalla maggiore variazione dei thermal sensation votes per un dato PET bin in ambiente outdoor; ciò indica una maggiore diversità nelle sensazioni termiche e conduce ad una quantità maggiore di insoddisfatti. Differentemente, per MTSV minori di -1.8 e maggiori di +1.8, i valori assunti dalla PPD Rome risultano essere inferiori rispetto a quelli derivanti dalla PPD ISO 7730. Una possibile spiegazione può essere trovata nel fatto che, in presenza di condizioni microclimatiche tali da comportare elevati livelli di thermal stress, le persone sono influenzate dal fatto che non possono controllare l'ambiente esterno e risultano pertanto essere più tolleranti. Per esempio, Yang et al. [78] hanno trovato che in climi caldi la temperatura preferita in ambienti outdoor è generalmente superiore ($0.7 \div 1.2$ °C nel loro studio) a quella che le persone preferiscono in ambienti indoor e semi outdoor, testimoniando l'influenza delle expectations e come gli individui all'esterno si aspettano condizioni generalmente più gravose.

Sempre con riferimento alla Fig. 6, è possibile notare come la curva PPD Glasgow [59] sia caratterizzata da percentuali di insoddisfatti sempre superiori, a parità di MTSV, rispetto a quelle della PPD Rome. In questo caso una spiegazione può essere trovata nell'influenza della velocità del vento: i ranges di tale variabile misurati durante le field surveys sono $0 \div 3.6$ m/s per Glasgow e $0 \div 2.5$ m/s per Roma. Tuttavia, in questo secondo caso è necessario considerare che il 91% dei valori rilevati è inferiore ad 1.5 m/s. Queste differenze influenzano la percentuale di insoddisfatti: attraverso uno studio condotto a Lisbona, Oliveira and Andrade [80] hanno mostrato come, per valori della velocità del vento inferiori a 2.25 m/s, nessuno era in uno stato di discomfort mentre, per valori più alti di

3.7 m/s, il 40% degli individui definiva il vento come eccessivo. Considerando che le temperature dell'aria rilevate durante lo studio di Oliveira and Andrade sono comprese nei ranges 16.6÷18.8 °C e 21.3÷23.5 °C, questi risultati possono essere estesi allo studio condotto a Glasgow: in questo secondo caso le temperature dell'aria rilevate durante la campagna variavano tra 7.9 e 21.9 °C e dovrebbe essere considerato il fatto che temperature inferiori a 16.6 °C potrebbero aumentare il numero di insoddisfatti. Inoltre, Glasgow è caratterizzata da una velocità media del vento di 4.8 m/s e quindi simile a quella di Lisbona, che è di 5.0 m/s. Questa similitudine tra i valori dovrebbe escludere un differente adattamento psicologico, specialmente con riferimento alla memoria ed alle aspettative. Infine, come riportato in Tab. 3, è necessario considerare che nel presente studio sono state misurate anche temperature dell'aria superiori a 23.5 °C: in queste condizioni la presenza di una certa velocità del vento viene percepita come un fattore piacevole.

1.7. Confronto tra le prestazioni del MOCI e quelle di altri indici

1.7.1. Analisi dei dati

Le prestazioni del Mediterranean Outdoor Comfort Index (MOCI) sono state confrontate con quelle di altri indici biometeorologici comunemente adoperati.

Tale confronto, in accordo con quanto fatto in altri studi [33][39], è stato effettuato attraverso tre criteri statistici [54] ed uno qualitativo. Il primo è lo Spearman's rho measure of correlation e può essere considerato una misura non parametrica della dipendenza tra quanto predetto dagli indici ed i voti dati dagli intervistati per giudicare la loro thermal perception. In particolare tale coefficiente valuta quanto bene la relazione tra le due variabili può essere descritta usando una funzione monotona ed ha il vantaggio di essere poco sensibile ai valori estremali (outliers). Il secondo criterio è la symmetrical measure of association Gamma e valuta come le classi predette dagli indici (Tab. 1.9) variano in relazione ai voti degli intervistati; misura quindi l'entità dell'associazione quando entrambe le variabili sono misurate ad un livello ordinale. Il terzo criterio analizza la percentuale totale di predizioni corrette mentre il quarto le valuta in funzione delle classi attraverso una cross-tabulation analysis. I primi due criteri investigano quindi la sensibilità degli indici mentre gli ultimi due ne verificano le prestazioni.

Tabella 1.9. Thermal perception votes e categorie corrispondenti dei vari indici.

Thermal perception votes	ASV _{EUROPE} [-] ^A	ET [°C]	MOCI [-]	PET [°C]	PMV [-]	Classes of the indices ^B
-3	< -1.08	< 1	< -2.5	< 4	< -2.5	-3
-2	-1.08 ÷ -0.82	1 ÷ 9	-2.5 ÷ -1.5	4 ÷ 8	-2.5 ÷ -1.5	-2
-1	-0.82 ÷ -0.45	9 ÷ 17	-1.5 ÷ -0.5	8 ÷ 18	-1.5 ÷ -0.5	-1
0	-0.45 ÷ -0.08	17 ÷ 21	-0.5 ÷ +0.5	18 ÷ 23	-0.5 ÷ +0.5	0
+1	-0.08 ÷ +0.23	21 ÷ 23	+0.5 ÷ +1.5	23 ÷ 35	+0.5 ÷ +1.5	+1
+2	+0.23 ÷ +0.61	23 ÷ 27	+1.5 ÷ +2.5	35 ÷ 41	+1.5 ÷ +2.5	+2
+3	> +0.61	> 27	> +2.5	> 41	> +2.5	+3

^A Assessment scale calibrated through probit analysis [33]

^B Con riferimento alla Fig. 1.8

Seguendo quanto fatto da Pantavou et al. [33][39], va inoltre detto che le scale di valutazione che focalizzano la loro attenzione sul concetto di thermal stress sono state modificate in accordo con Epstein and Moran [12]; essi hanno infatti relazionato le sensazioni termiche ai loro effetti fisiologi-

ci. Differentemente le scale basate sul concetto di thermal comfort sono rimaste invariate perché, come dimostrato da Nicol [95], un eventuale intervistato utilizza una thermal sensation scale o una thermal comfort scale allo stesso modo.

Infine per valutare in questa ricerca se il newly developed Mediterranean Outdoor Comfort Index (MOCI) porta effettivamente ad un miglioramento nella predizione dell'outdoor thermal comfort, i valori assunti per ogni indice dai coefficienti di correlazione e dalla percentuale totale di predizioni corrette sono stati normalizzati prendendo come riferimento il valore massimo. I tre valori normalizzati sono stati poi sommati per ottenere un parametro obiettivo di confronto.

1.7.2. Risultati e discussioni

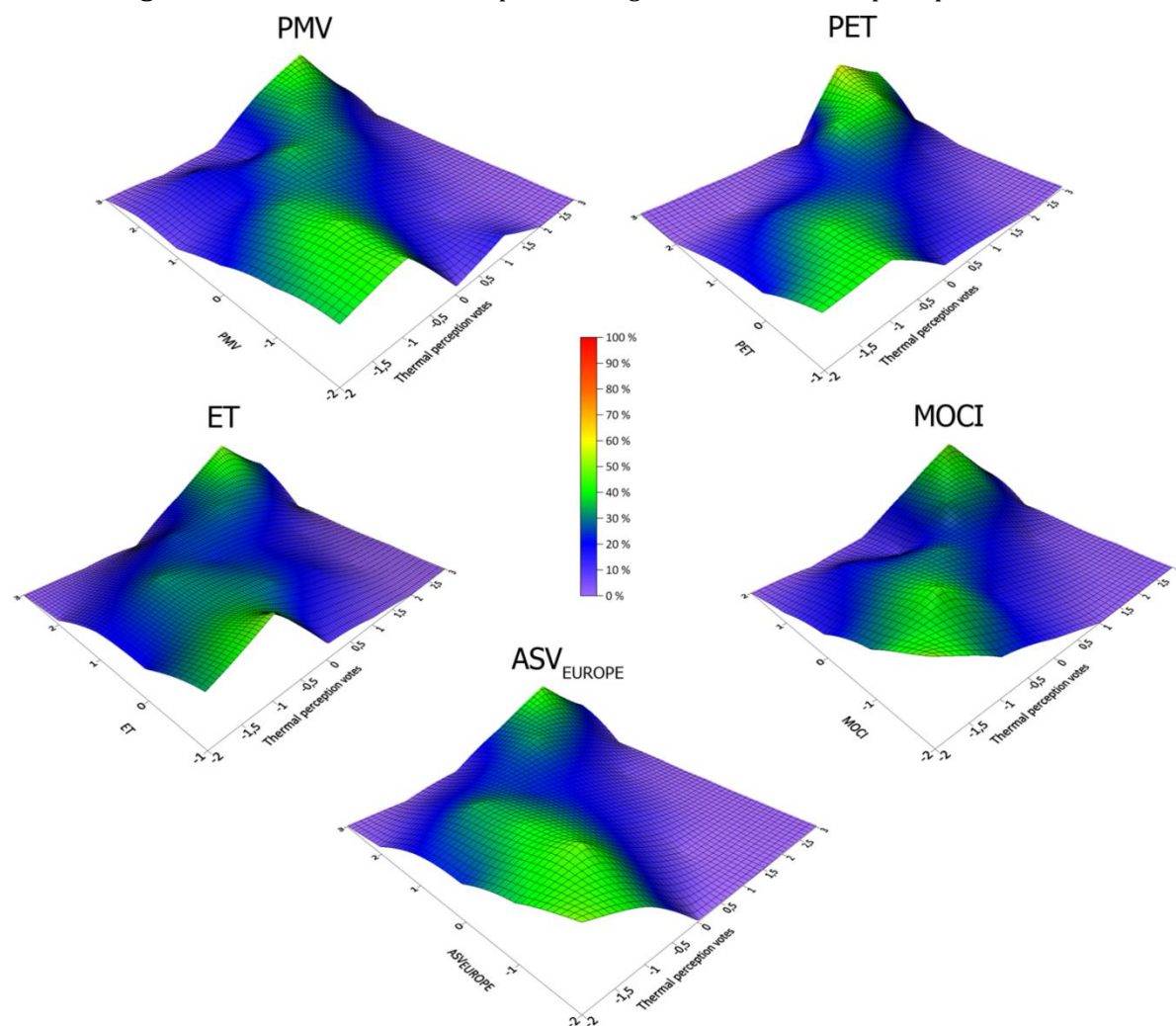
In Tab. 1.10 sono riportati i coefficienti di correlazione tra quanto predetto dagli indici ed i voti dati dagli intervistati; viene riportata anche la percentuale totale di predizioni corrette.

Tabella 1.10. Percentuale totale di predizioni corrette e coefficienti di correlazione tra i valori predetti dagli indici ed i voti dati dagli intervistati.

Index	Coefficients		Percentage of correct predictions [%]
	Spearman [-]	Gamma [-]	
ASV _{EUROPE}	0.405	0.470	21.1
ET	0.444	0.487	29.6
MOCI	0.497	0.549	35.5
PET	0.494	0.493	29.6
PMV	0.505	0.536	32.3

In questa ricerca il PMV ha lo Spearman coefficient più alto (0.505) mentre il valore medio dello stesso coefficiente risulta essere di 0.469, circa 0.13 unità inferiore rispetto a quanto determinato da Pantavou et al. [39]. Per quanto concerne la symmetrical measure of association Gamma, il valore più elevato è stato invece determinato per il MOCI (0.549); anche in questo caso è stato però rilevato un decremento del valore medio rispetto allo studio condotto da Pantavou et al. [39]. Da questo punto di vista è necessario dire che in quel caso la field survey aveva investigato, oltre alla stagione estiva e quella autunnale, anche l'inverno, con valori di temperatura dell'aria compresi tra 7.1 °C e 39.3 °C. In questa ricerca invece lo studio non ha coperto la stagione fredda e proprio a ciò può essere imputata la minor correlazione e quindi l'inferiore valore medio dei due coefficienti. Occorre tuttavia considerare che la città di Roma appartiene alla categoria Csa della classificazione dei climi di Köppen-Geiger [24] e le sollecitazioni termiche più intense si hanno proprio durante il periodo estivo. In inverno invece raramente sono registrate temperature basse e le persone possono limitare l'esposizione alle condizioni microclimatiche aumentando il grado di isolamento termico del vestiario. Conseguentemente l'approccio alla progettazione di spazi outdoor termicamente confortevoli deve tenere conto di tali fattori e si deve basare su un indice in grado di assicurare il maggior numero di predizioni corrette specialmente in condizioni di caldo. Da questo punto di vista il MOCI sembra essere l'indice più performante determinando compiutamente il 35.5% dei voti dati dagli intervistati. Riesce in particolare a lavorare bene nel range di percezione termica (-1) ÷ (+1) (Fig. 1.8), cioè in quella fascia che la Tabella 2 dell'ISO 7730 [45] assume come rappresentativa del thermal comfort.

Figura 1.8. Relazione tra le classi predette dagli indici ed i thermal perception votes.



Attraverso una sorta di cross-tabulation analysis, la Fig. 1.8 permette infatti di valutare come i thermal perception votes dati dagli intervistati sono distribuiti in funzione di ciascuna classe del corrispondente indice. Nell'analisi occorre quindi tenere conto che la somma dei valori percentuali afferenti a ciascuna classe deve dare come risultato 100%. La situazione ideale sarebbe quella in cui i voti si collocano sulla cosiddetta "linea identità": ciò vuol dire che verrebbe registrato un valore di 100% nell'intersezione della categoria (-2) dell'indice e del thermal perception vote (-2), della categoria (-1) e del voto (-1) e così via di seguito. In questo caso infatti tutte le predizioni sarebbero corrette.

Chiaramente la realtà è ben diversa: come detto sopra, per il MOCI valori significativi si registrano in corrispondenza del range (-1) ÷ (+1) e non devono trarre in inganno i valori relativi alle intersezioni (-2) / (-2) e (+2) / (+2), dove i risultati sono influenzati dal ridotto numero di occorrenze nelle corrispondenti classi dell'indice.

Come era possibile ipotizzare dai valori dei coefficienti di correlazione, il secondo indice che meglio simula l'outdoor thermal comfort in ambito mediterraneo è il PMV. Esso è infatti caratterizzato da un'abilità predittiva totale del 32.3% ma, come si evince dalla Fig. 1.8, dimostra una buona

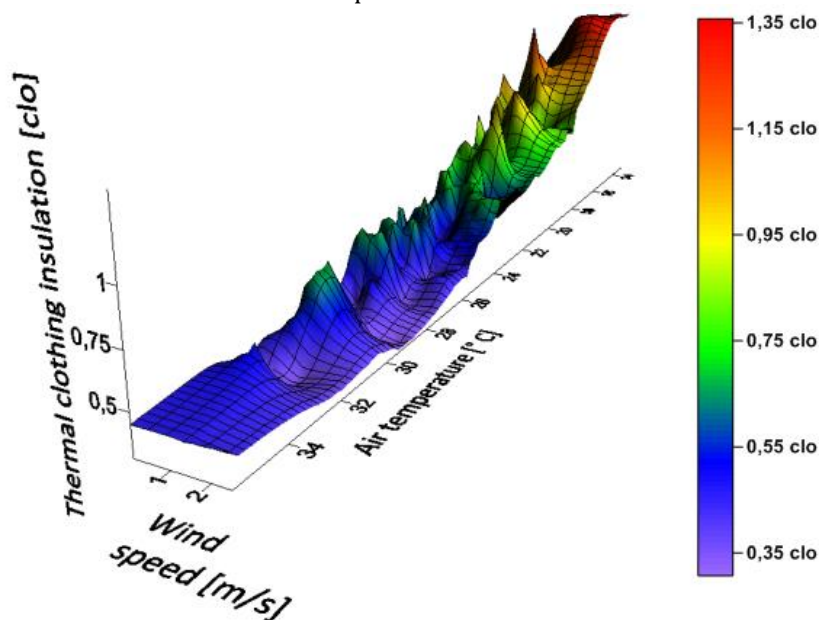
affidabilità anche in corrispondenza dei voti (+2) e (+3) (anche se le considerazioni fatte per quest'ultimo valore, così come per la categoria (-2), sono influenzate dal ridotto numero di persone che lo ha scelto per giudicare la qualità termica dell'ambiente). Per il calcolo di questo indice, effettuato attraverso RayMan [85], erano state poi necessarie informazioni quali peso ed altezza degli individui (ricavate dai questionari). Uno studio validato su larga scala [96] ha mostrato tuttavia come, in media, le donne giovani sottostimino il loro peso di circa 1.5 kg e le persone anziane sovrastimino la loro altezza di 2 ÷ 4 cm. Occorre quindi dire che, sebbene in minima misura, anche tale aspetto può avere influenzato l'abilità predittiva del PMV.

Una percentuale minore di predizioni corrette è stata invece riscontrata per gli altri indici considerati: 29.6% per PET ed ET, 21.1% per l'ASV_{EUROPE}.

Tali valori trovano riscontro anche nei corrispondenti grafici di Fig. 1.8. Tuttavia, qualora considerassimo la PET, ci si potrebbe chiedere come mai viene riscontrata un'abilità predittiva del 29.6% avendo valori piuttosto elevati in corrispondenza delle intersezioni (+2) / (+2) e (+3) / (+3). La risposta in questo caso risiede nel fatto che le occorrenze nelle classi (+2) e (+3) della PET sono rispettivamente 13 e 5. La situazione risulta invece più chiara nel caso di ET ed ASV_{EUROPE}: sempre dall'esame di Fig. 1.8, è possibile infatti notare come le percentuali più elevate siano spostate a sinistra della cosiddetta "linea identità".

Una possibile spiegazione ai valori di abilità predittiva può essere trovata nel fatto che questi ultimi tre indici, a differenza di MOCI e PMV, non valutano differenti livelli di isolamento termico del vestiario; se la PET assume un valore costante di 0.9 clo, tale variabile operativa non compare nelle relazioni di ET ed ASV_{EUROPE} (basate meramente su variabili ambientali).

Figura 1.9. Valori di isolamento termico del vestiario in funzione di velocità del vento e temperatura dell'aria.



Come è infatti possibile osservare in Fig. 1.9, le persone nell'area mediterranea tendono ad adattare il loro vestiario alle condizioni climatiche esterne. In particolare la temperatura dell'aria

sembra essere la variabile che più incide sull'isolamento del vestiario mentre la velocità del vento diviene influente soprattutto a basse temperature e quando, assumendo valori elevati, comanda gli scambi termici di tipo convettivo. È proprio in queste condizioni che l'effetto del vento diviene particolarmente indesiderabile ed è, ad esempio, per questa ragione che il wind-chill index era stato inizialmente sviluppato per condizioni artiche [42] ed è usato di solito in climi freddi.

Sempre con riferimento all'analisi dell'abilità predittiva degli indici, merita poi di essere approfondita la questione relativa all'ASV_{EUROPE}. In questa ricerca esso è stato studiato considerando una scala di valutazione calibrata (Tab. 1.9), attraverso probit analysis, dopo uno studio effettuato in 3 differenti siti urbani ad Atene (Grecia) [33]. Sono stati quindi definiti anche per tale indice 7 differenti intervalli e ciò spiega la diminuzione dei valori percentuali nelle categorie centrali (Fig. 1.8). La situazione sarebbe stata differente qualora fosse stata considerata la scala di valutazione non calibrata riportata in Tabella 4 da Pantavou et al. [33]: in questo caso la percentuale di predizioni corrette sarebbe stata del 70.9%. È tuttavia necessario dire che tale valore è influenzato dalle assunzioni fatte: infatti nell'ambito del project RUROS (Rediscovering the Urban Realm and Open Spaces) [25] è stata adoperata una scala di 5 valori che variava da "very cold" (-2) a "very hot" (+2). Nel presente studio invece è stata adoperata per la field survey l'ASHRAE 7-point scale e ciò avrebbe portato i voti (-1), (0) e (+1) (dati dagli intervistati) a confluire nella categoria (-0.5) ÷ (+0.5) della scala non calibrata dell'ASV_{EUROPE} (con valori di abilità predittiva di questo indice nel range centrale della scala al di sopra del 90%). Un vero e proprio confronto non è quindi possibile ma ciò, come sottolineato anche in altri casi [13], pone l'accento sulla necessità di avere una standardizzazione (non solo con riferimento a scale di valutazione e struttura dei questionari, ma anche siti di misura, tipo e posizionamento degli strumenti, determinazione della temperatura media radiante...) della procedura di analisi di outdoor thermal comfort ed organizzazione delle field surveys.

In Tab. 1.11 sono poi riportati i valori dei coefficienti di correlazione e della percentuale totale di predizioni corrette normalizzati rispetto al valore massimo che ciascun criterio assume.

Tabella 1.11. Percentuale totale di predizioni corrette e coefficienti di correlazione tra i valori predetti dagli indici ed i voti dati dagli intervistati normalizzati in funzione del valore massimo di ciascun criterio.

Index	Normalized values			Total
	Coefficients		Percentage of correct predictions [%]	
	Spearman [-]	Gamma [-]		
ASV _{EUROPE}	0.80	0.86	0.59	2.25
ET	0.88	0.89	0.83	2.60
MOCI	0.98	1.00	1.00	2.98
PET	0.97	0.90	0.83	2.70
PMV	1.00	0.98	0.91	2.89

Ad esempio lo Spearman coefficient più alto era stato misurato per il PMV ed è per questa ragione che, nella corrispondente categoria, questo indice assume il valore 1.00. Attraverso questo processo di normalizzazione dei criteri di valutazione, vuole essere ottenuto un parametro quanto più obiettivo possibile di comparazione tra le prestazioni dei vari indici. Il totale più alto corrisponde all'indice che, sulla base dei tre criteri statistici, predice meglio la percezione termica nell'area mediterranea.

In accordo quindi con la Tab. 1.11, il MOCI è l'indice più adatto ad esaminare l'outdoor thermal comfort nell'area considerata, seguito da indici termo-fisiologici quali PMV e PET. Valori totali inferiori sono stati invece determinati per ET e ASV_{EUROPE}; questa può essere una conseguenza della relativa semplicità caratterizzante le equazioni alla base dei rispettivi modelli, che possono essere facilmente calcolati da parametri meteorologici. Va però sottolineato ancora una volta che, nel caso dell'ASV_{EUROPE}, le prestazioni e quindi il totale sono influenzati dalla scelta della scala adoperata.

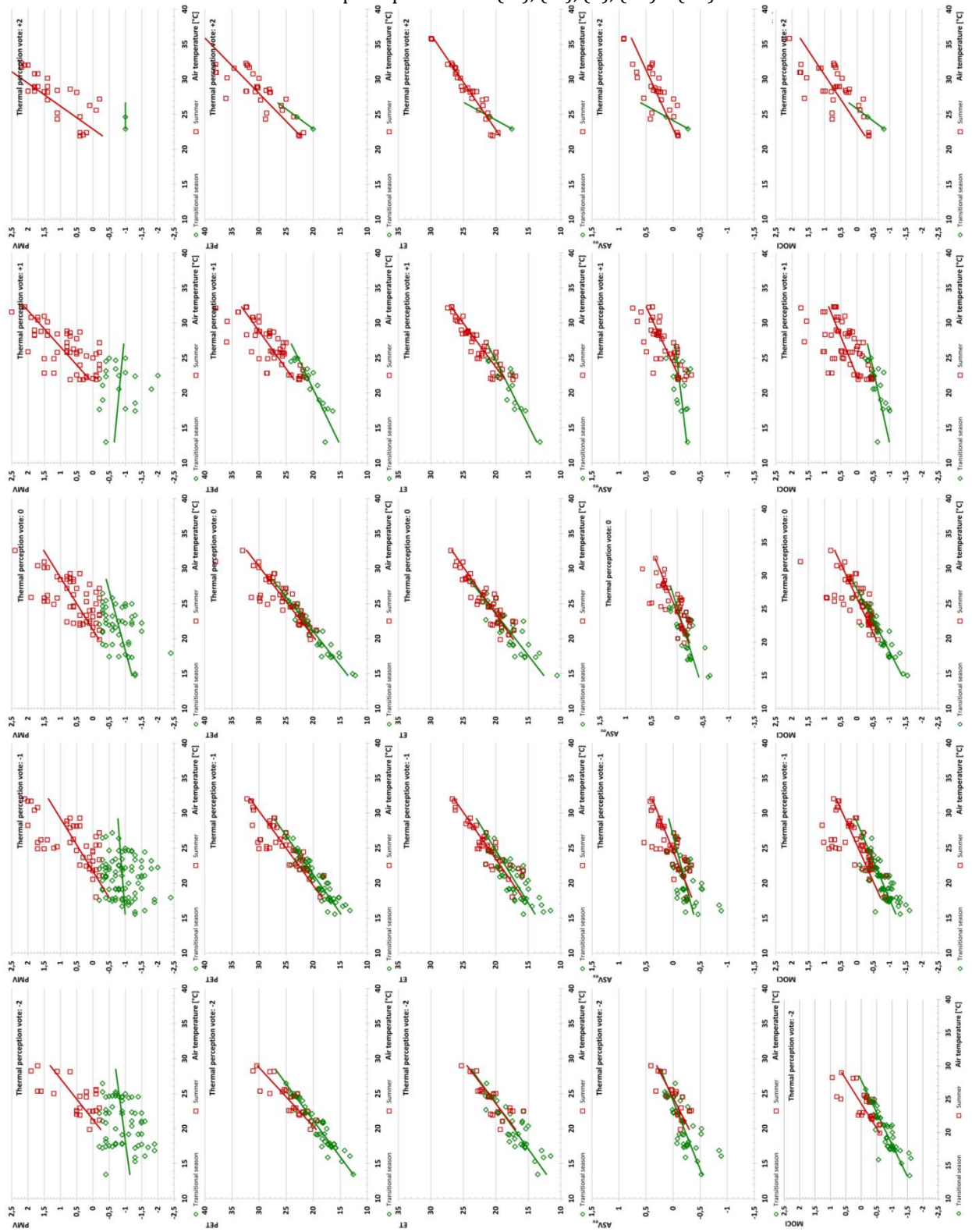
Riprendendo parzialmente quanto fatto da Tseliou et al. [41], può essere interessante valutare anche la relazione tra i thermal perception votes dati dagli intervistati ed i corrispondenti valori indicati dai vari indici in funzione della stagione e della temperatura dell'aria. Conseguentemente per ognuno dei cinque indici analizzati, i dati rilevati attraverso la field survey sono stati divisi in due gruppi: uno rappresentativo della stagione estiva (in rosso in Fig. 1.10) ed uno di quella autunnale (verde in Fig. 1.10). Sono stati così ricavati dieci sottogruppi ed è stato quindi possibile operare una seconda divisione dei dati: in questo caso essi sono stati categorizzati in accordo al corrispondente thermal perception vote (escludendo i valori (-3) e (+3) a causa del ridotto numero di occorrenze). Per ciascuno dei sottogruppi ricavati, i dati sono stati poi graficati in funzione dell'indice di volta in volta esaminato e della temperatura dell'aria.

Un indice atto a valutare il thermal comfort dovrebbe essere teoricamente in grado di descrivere la percezione termica di un individuo in ogni contesto climatico. Ci si aspetta quindi che gli indici dovrebbero avere un valore più o meno stabile. Con riferimento alla Tab. 1.9, questo significa quindi che, a fronte di un thermal perception vote di -2, i corrispondenti valori della PET dovrebbero essere tra 4 ed 8 °C, i valori del MOCI tra -2.5 e -1.5 e così via di seguito per gli altri indici e per gli altri valori dei voti dati dagli intervistati.

In questo studio è stata tuttavia riscontrata una certa dipendenza dei vari indici dalla temperatura dell'aria. Questa può essere considerata una conseguenza di aspetti legati ad adattamento ed acclimatamento che causano differenze tra i valori predetti dagli indici ed i voti dati dai partecipanti alla survey. In particolare, come è possibile osservare dalla slope delle linee di regressione, tale dipendenza dalla temperatura dell'aria risulta più marcata per PET ed ET. Ad eccezione del PMV, è stata poi rilevata una certa tendenza dei valori stimati per i vari indici a shiftare verso condizioni rappresentative di sensazioni termiche neutrali e ciò avviene soprattutto per i thermal perception votes compresi tra 0 e -2. Proprio in queste categorie gli indici dimostrano in generale una buona stabilità di predizione. È interessante invece notare, soprattutto per MOCI e PET, come per thermal perception votes positivi emerga la maggiore tolleranza della popolazione mediterranea verso condizioni calde. I dati rilevati per il periodo estivo sono infatti sistematicamente associati a valori degli indici superiori rispetto a quelli rilevati per il periodo autunnale (rimanendo la stessa la categoria del voto dato dagli intervistati).

La situazione sembra infine differire per il PMV, caratterizzato da una scarsa stabilità predittiva in corrispondenza di ciascuna categoria di percezione termica.

Figura 1.10. Dipendenza stagionale dei vari indici in funzione della temperatura dell'aria per le classi di thermal perception votes (-2), (-1), (0), (+1) e (+2).



1.8. Il Global Outdoor Comfort Index

1.8.1. La formulazione dell'indicatore

Per procedere alla creazione del nuovo Global Outdoor Comfort Index (GOCI) sono state combinate le relazioni empiriche fornite attraverso studi effettuati in differenti parti del mondo (Tab. 1.12).

Tabella 1.12. Studi ed indici empirici creati attraverso field surveys.

Città	Voti	Equazione	Scala
Mendoza, Argentina [50]	622	$IZA=0.9796+0.0621 \cdot T_A-0.3257 \cdot WS+0.0079 \cdot RH$	(-2)-(+2)
Sao Paulo, Brazil [54]	1,750	$TSP=-3.557+0.0632 \cdot T_A+0.0677 \cdot MRT+0.0105 \cdot RH-0.304 \cdot WS$	(-3)-(+3)
Guangzhou, China [49]	1,582	$ASV=-8.527+0.245 \cdot T_A-0.457 \cdot WS+0.059 \cdot MRT+0.013 \cdot RH$	(-3)-(+3)
Hong Kong [29]	286 ^A	$TS=-4.77+0.1185 \cdot T_A-0.6019 \cdot WS+0.0025 \cdot SR+0.1155 \cdot RH$	(-3)-(+3)
Wuhan, China [53]	490	$TSV_{WUHAN}=-1.382+0.0643 \cdot T_A+0.00076 \cdot G-0.161 \cdot WS-0.00376 \cdot RH$	(-1)-(+1)
Kassel, Germany [25]	824	$ASV=-0.876+0.043 \cdot T_A+0.0005 \cdot G-0.077 \cdot WS+0.001 \cdot RH$	(-2)-(+2)
Athens, Greece [25]	1,503	$ASV=-0.412+0.034 \cdot T_A+0.0001 \cdot G-0.086 \cdot WS-0.001 \cdot RH$	(-2)-(+2)
Thessaloniki, Greece [25]	1,813	$ASV=-2.197+0.036 \cdot T_A+0.0013 \cdot G-0.038 \cdot WS+0.011 \cdot RH$	(-2)-(+2)
Milan, Italy [25]	1,173	$ASV=-0.92+0.049 \cdot T_A-0.0002 \cdot G+0.006 \cdot WS+0.002 \cdot RH$	(-2)-(+2)
Rome, Italy [26] ^B	941	$MOCI=-3.649-0.273 \cdot WS+0.005 \cdot RH+0.086 \cdot MRT+0.044 \cdot T_A$	(-3)-(+3)
Yokohama, Japan [51]	1,134 ^C	$TS=1.2+0.1115 \cdot T_A+0.0019 \cdot SR-0.3185 \cdot WS$	(+1)-(+7)
Fribourg, Switzerland [25]	1,920	$ASV=-0.69+0.068 \cdot T_A+0.0006 \cdot G-0.107 \cdot WS-0.002 \cdot RH$	(-2)-(+2)
Birmingham, UK [52]	451	$CV=3.2464+0.0665 \cdot T_A-0.2256 \cdot WS-0.0079 \cdot RH+0.0011 \cdot SR$	(+1)-(+5)
Cambridge, UK [25]	948	$ASV=-1.74+0.113 \cdot T_A+0.0001 \cdot G-0.05 \cdot WS-0.003 \cdot RH$	(-2)-(+2)
Sheffield, UK [25]	1,008	$ASV=-0.855+0.07 \cdot T_A+0.0012 \cdot G-0.057 \cdot WS-0.003 \cdot RH$	(-2)-(+2)
Melbourne, Australia [57]	1,059	Women: $MTSV=0.162 \cdot PET-3.4355$ Men: $MTSV=0.144 \cdot PET-2.9399$	(-3)-(+3)
Belo Horizonte, Brazil [60]	1,693	Hot season: $MTSV=-8.12+2.94 \cdot \log(PET)$ Cool season: $MTSV=-5.34+1.61 \cdot \log(PET)$ Winter: $TSV=-2.81+0.18 \cdot PET$	(-3)-(+3)
Guangzhou, China [61]	1,005	Spring: $TSV=-6.40+0.25 \cdot PET$ Summer: $TSV=-0.36+0.07 \cdot PET$	(-4)-(+4)
Cairo, Egypt [28]	300	Hot season: $MTSV=0.145 \cdot PET-3.625$ Cold season: $MTSV=0.071 \cdot PET-2.479$	(-3)-(+3)
Cairo, Egypt [58]	320	Summer: $MTSV=0.0998 \cdot PET-2.947$ Winter: $MTSV=0.0881 \cdot PET-2.1411$	(-3)-(+3)
Szeged, Hungary [34][55]	967	$TSV=-0.004 \cdot PET^2+0.278 \cdot PET-3.61$	(-4)-(+4)
Umeå, Sweden [62]	525	$MTSV=-1.81+0.1365 \cdot PET$	(-3)-(+3)
Damascus, Syria [31]	920	Summer: $TSV=0.060 \cdot PET-0.941$ Winter: $TSV=0.114 \cdot PET-2.755$	(-4)-(+4)
Taichung, Taiwan [27]	505	Hot season: $MTSV=0.118 \cdot PET-3.025$ Cool season: $MTSV=0.199 \cdot PET-4.722$	(-3)-(+3)
Glasgow, UK [59]	573	$TS=0.118 \cdot PET-1.5919$	(-3)-(+3)
Tempe, USA [56]	1,284	$MTSV=0.08 \cdot PET-2.4$	(-4)-(+4)
Chiayi, Taiwan [63]	1,644 ^D	Hot season: $MTSV=0.130 \cdot SET^*-3.814$	(-3)-(+3)
Taichung, Taiwan [63]	1,644 ^D	Cool season: $MTSV=0.074 \cdot SET^*-2.066$	(-3)-(+3)
Yunlin, Taiwan [63]	1,644 ^D		
Crete, Greece [64]	800	$ASV=0.16 \cdot PMV+0.22$	(-2)-(+2)

^A Un gruppo di 8 studenti.

^B Relazione ricavata appositamente per questo studio.

^C Un gruppo di 6 studenti.

^D Totale per le tre città.

Il primo passo ha riguardato la definizione di una serie di variabili da settare come indipendenti. Esse sono la temperatura dell'aria T_A , la temperatura media radiante MRT, l'umidità relativa RH, la velocità del vento WS e, con riferimento alla località, la latitudine L, l'altitudine h, la temperatura media annuale T_{AV} , la temperatura media del mese più caldo T_M e la temperatura media del mese più freddo T_m (Tab. 1.13). L'inserimento di queste ultime due variabili vuole tenere conto dell'annual temperature swing [36].

Tabella 1.13. Caratteristiche climatiche delle città in cui sono state ricavate le relazioni empiriche e stagioni investigate.

City	Periodo investigato	Latitudine	Temp. media annuale [97]	Temp. media mese più caldo [97]	Temp. media mese più freddo [97]	Altitudine
Mendoza, Argentina [50]	July, December	32.4° S	16.4 °C	24.0 °C	8.1 °C	824 m
Sao Paulo, Brazil [54]	Summer, winter	23.3° S	18.5 °C	21.5 °C	15.4 °C	760 m
Guangzhou, China [49][61]	All year ^A	23.1° N	22.2 °C	28.8 °C	13.9 °C	21 m
Hong Kong [29]	Summer, winter	22.3° N	22.6 °C	28.4 °C	15.4 °C	3 m
Wuhan, China [53]	August to November	30.4° N	17.2 °C	29.4 °C	4.0 °C	37 m
Kassel, Germany [25]	All year	51.3° N	9.1 °C	17.7 °C	0.2 °C	133-615 m
Athens, Greece [25]	All year	38.0° N	18.1 °C	27.9 °C	9.5 °C	70-338 m
Thessaloniki, Greece [25]	All year	40.6° N	15.9 °C	26.5 °C	5.2 °C	0-250 m
Milan, Italy [25]	All year	45.5° N	13.1 °C	23.8 °C	1.9 °C	122 m
Rome, Italy [26]	All year	41.5° N	15.7 °C	24.4 °C	7.7 °C	21 m
Yokohama, Japan [51]	All seasons	35.4° N	9.1 °C	21.9 °C	-2.6 °C	24 m
Fribourg, Switzerland [25]	All year	46.8° N	8.1 °C	17.0 °C	-0.9 °C	643 m
Birmingham, UK [52]	August–February	52.5° N	9.2 °C	15.7 °C	3.2 °C	140 m
Cambridge, UK [25]	All year	52.2° N	9.7 °C	16.6 °C	3.1 °C	6 m
Sheffield, UK [25]	All year	53.4° N	9.6 °C	16.2 °C	3.8 °C	75 m
Melbourne, Australia [57]	November-May	37.5° S	14.8 °C	20.3 °C	9.4 °C	31 m
Belo Horizonte, Brazil [60]	March, July	19.5° S	25.0 °C	26.3 °C	23.2 °C	858 m
Cairo, Egypt [28]	Summer, winter	31.0° N	21.3 °C	27.6 °C	13.1 °C	23 m
Cairo, Egypt [58]	June, July, December	31.0° N	21.3 °C	27.6 °C	13.1 °C	23 m
Szeged, Hungary [34][55]	Autumn, spring	46.3° N	10.8 °C	20.8 °C	-1.4 °C	75 m
Umeå, Sweden [62]	July, August	63.5° N	2.7 °C	15.9 °C	-9.7 °C	12 m
Damascus, Syria [31]	Summer, winter	33.6° N	16.9 °C	26.2 °C	6.9 °C	700 m
Taichung, Taiwan [27]	All year	24.1° N	22.1 °C	27.6 °C	15.7 °C	91 m
Glasgow, UK [59]	March to July	55.9° N	8.5 °C	14.5 °C	3.0 °C	40 m
Tempe, USA [56]	All year	33.4° N	21.5 °C	32.7 °C	11.4 °C	360 m
Chiayi, Taiwan [63]	Winter to summer	23.3° N	23.2 °C	27.9 °C	17.4 °C	69 m
Taichung, Taiwan [63]	Winter to summer	24.1° N	22.1 °C	27.6 °C	15.7 °C	91 m
Yunlin, Taiwan [63]	Winter to summer	23.7° N	18.8 °C	26.4 °C	10.6 °C	53 m
Crete, Greece [64]	February, July	35.3° N	19.0 °C	26.5 °C	12.2 °C	0-184 m

^A Tiene conto del periodo investigato nei due differenti studi.

Le variabili connesse alla collocazione geografica del sito di volta in volta esaminato servono a contemplare l'influenza di fattori quali adattamento, acclimatamento ed aspettativa termica mentre le variabili micrometeorologiche delineano la specifica configurazione ambientale da analizzare. In alcuni degli studi riportati in Tab. 1.12 compare tra le variabili indipendenti la radiazione solare. In

questo studio è stata invece inserita nel modello la temperatura media radiante: se una variazione nella radiazione solare conduce ad una variazione nella temperatura media radiante non è infatti vero il contrario. È stata conseguentemente ricavata, sfruttando i dati sperimentali campionati in ambiente urbano durante differenti field surveys, una relazione empirica che permette di correlare le due variabili. Un approccio analogo è stato seguito per la PET, la SET* ed il PMV. In questo caso sono state infatti ricavate delle relazioni tra i suddetti tre indici e le quattro variabili micrometeorologiche considerate sfruttando il software Rayman [85]. Tale processo ha permesso di esplicitare tutte le relazioni riportate in Tab. 1.12 in funzione di temperatura dell'aria, temperatura media radiante, umidità relativa e velocità del vento. Va inoltre detto che come forzante microclimatica esterna sono stati usati i dati campionati durante le varie field surveys ed i risultati forniti da ciascuna relazione sono stati ricondotti all'ASHRAE 7-point scale.

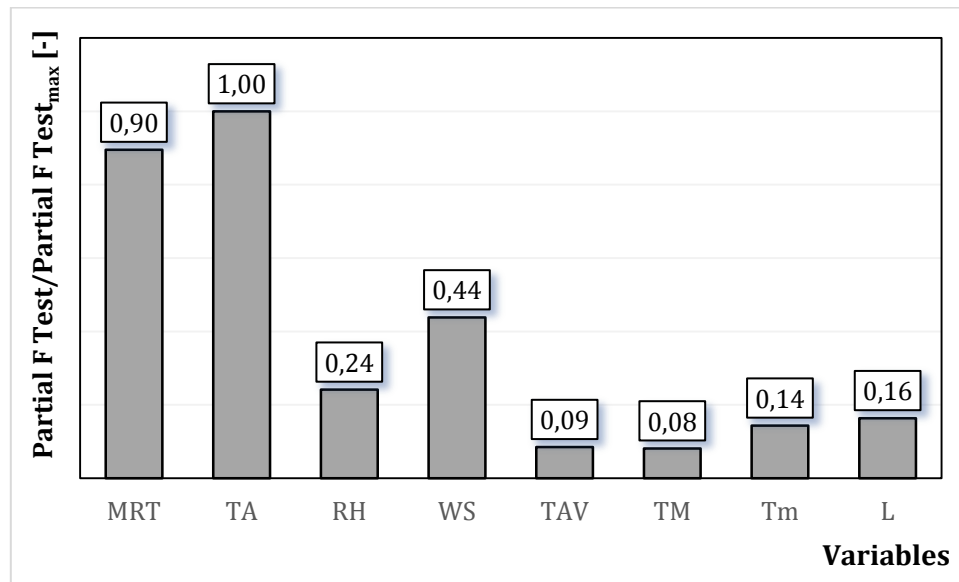
A questo punto è stato possibile valutare la multicollinearità tra le nove variabili preliminarmente selezionate mediante l'analisi del VIF (Variance Inflationary Factor). Le variabili collineari non comportano un valore aggiunto significativo nel modello e, in accordo con Marquardt [91], quelle con un valore del VIF maggiore di 10 dovrebbero essere escluse. Nel presente studio è stata conseguentemente eliminata l'altitudine, strettamente legata ai corrispondenti valori di temperatura. Per individuare poi il modello più fittante, le otto variabili rimanenti sono state combinate attraverso una Best Subsets Analysis. Essa ha condotto a comparare i 254 possibili modelli sulla base di criteri quali l' R^2 corretto e la statistica C_p . Nel presente studio il modello con i migliori valori di tali parametri è quello che vede il contemporaneo inserimento delle otto variabili. La statistica C_p risulta infatti essere uguale ad 8, l' R^2 corretto a 0.379 ed il coefficiente di Pearson a 0.616. Viene quindi riportata la relazione alla base del Global Outdoor Comfort Index (GOCI) (Eq. (22)):

$$GOCI = -0.908 + 0.053 \cdot MRT + 0.084 \cdot T_A + 0.006 \cdot RH - 0.229 \cdot WS - 0.056 \cdot T_{AV} - 0.026 \cdot T_M - 0.042 \cdot T_m + 0.009 \cdot L \quad (22)$$

1.8.2. Valutazione analitica e peso delle variabili indipendenti

È stato scelto un modello lineare in base all'andamento non strutturato dei residui e la presenza di una relazione significativa intercorrente tra le variabili indipendenti ed il GOCI è testimoniata dal valore del test F (1583). Esso è infatti superiore ad 1.94, valore corrispondente al 95° percentile della pdf di Fischer per una distribuzione F con 8 e 22,584 gradi di libertà, rispettivamente variabili indipendenti e numero di occorrenze. Focalizzando il discorso sulle singole variabili, la presenza di una relazione lineare significativa tra queste ed il GOCI vuole inoltre essere quantificata. Essa risulta essere presente qualora i valori assunti per la statistica t dalla variabile esaminata cadano al di fuori del range ± 1.960 , determinato attraverso i valori percentili per la distribuzione t di Student con 22,584 gradi di libertà ed un livello di significatività pari a 0,05. In particolare, questo avviene in misura maggiore per la temperatura dell'aria (24.70), la temperatura media radiante (22.11) e la velocità del vento (-10.83). Ciò ha chiaramente ripercussioni sul contributo che ciascuna variabile indipendente è in grado di apportare al modello sviluppato. La Fig. 1.11 riporta i valori del test F parzialmente normalizzati rispetto al massimo valore rilevato. Quest'ultimo è stato riscontrato per la temperatura dell'aria ed è per questo motivo che in Fig. 1.11 tale variabile riporta il valore unitario.

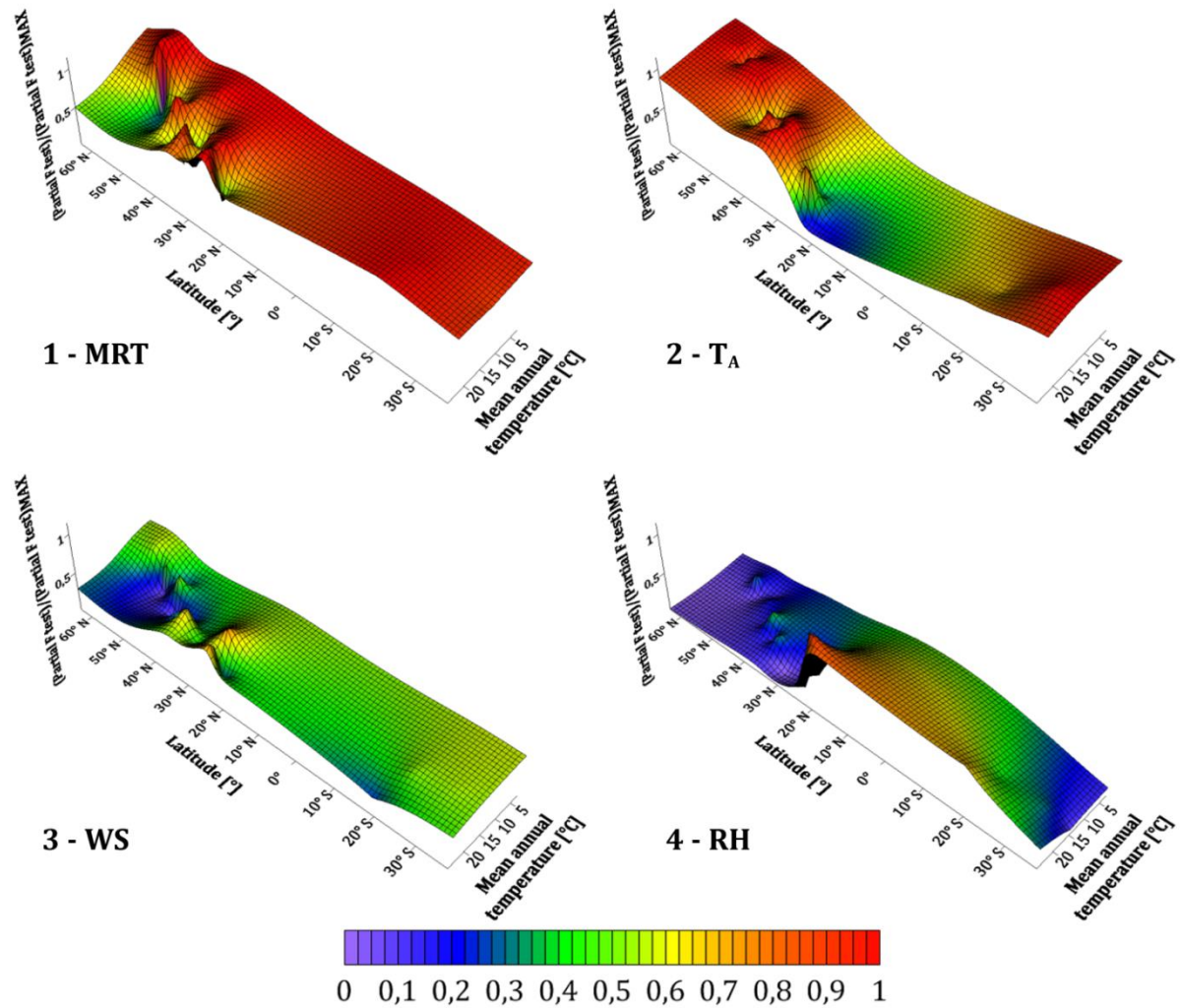
Figura 1.11. Valori del test F parziale normalizzati rispetto al massimo valore rilevato.



È possibile osservare come un contributo importante al GOCI venga dato anche dalla temperatura media radiante e dalla velocità del vento. Va però sottolineato come l'elevata influenza rilevata per la temperatura dell'aria sia una conseguenza del fatto che, per costruire il modello alla base del nuovo indice proposto, sono stati implementati anche indici ricavati in città aventi climi ventosi. In questi casi infatti la temperatura dell'aria diviene la variabile dominante in quanto strettamente legata agli scambi termici convettivi [10][21]. È questa la situazione opposta rispetto a quanto avviene in città dal clima poco ventoso, dove è invece la temperatura media radiante ad avere maggior peso sull'outdoor thermal comfort [98]. Un esempio può essere trovato nella città di Roma [26].

La Fig. 1.12 conferma poi l'elevata influenza esercitata da temperatura dell'aria e temperatura media radiante sulla percezione termica. Essa riporta i valori del test F parziale normalizzati rispetto al massimo valore rilevato in funzione di latitudine e temperatura media annuale per le quattro variabili ambientali incluse nel GOCI.

Figura 1.12. Valori del test F parziale normalizzati rispetto al massimo valore rilevato in funzione di latitude and mean annual temperature per mean radiant temperature MRT (1), air temperature TA (2), wind speed WS (3) and relative humidity RH (4).



In particolare, è possibile notare come l'influenza della temperatura dell'aria diminuisca nelle aree prossime all'equatore, dove sono invece gli elevati valori di global radiation ad avere maggior peso. Nelle medesime aree è stata riscontrata inoltre una sensibile influenza dell'umidità relativa, molto probabilmente come conseguenza degli elevati valori di temperatura dell'aria a cui è combinata. Per quanto riguarda invece la velocità del vento, è significativo come i valori maggiori del test F parziale siano ravvisati in corrispondenza di basse temperature medie annuali per buona parte delle latitudini.

1.8.3. Confronto con altri indici

Il GOCI è stato confrontato con altri indici biometeorologici comunemente adoperati quali il PMV e la PET e con il MOCI (tarato, come detto in precedenza, proprio sulla percezione termica della popolazione mediterranea). Tale confronto, svolto a seguito di una field survey effettuata nella città di Roma (Italia), viene effettuato in accordo alla stessa metodologia ed agli stessi criteri che avevano

portato in precedenza alla valutazione delle prestazioni del MOCI. Chiaramente, con riferimento alla Tab. 1.9, le classi relative al GOCI coincidono con quelle del MOCI e del PMV.

In Tab. 1.14 vengono quindi riportati i risultati ottenuti.

Tabella 1.14. Percentuale totale di predizioni corrette e coefficienti di correlazione tra i valori predetti dagli indici ed i voti dati dagli intervistati.

Index	Coefficienti		Percentuale di predizioni corrette [%]
	Spearman [-]	Gamma [-]	
GOCI	0.551	0.630	27.8
MOCI	0.555	0.568	32.2
PET	0.547	0.562	25.4
PMV	0.522	0.526	27.7

Dai valori riportati è possibile notare come l'indice che meglio predice la percezione termica è il MOCI. Esso ottiene infatti una percentuale totale di predizioni corrette del 32.2%, il valore più elevato per lo Spearman's rho measure of correlation ed il secondo miglior riscontro per la symmetrical measure of association Gamma. Per quanto concerne invece le prestazioni del GOCI, esso risulta essere l'indice più sensibile, come testimoniato dagli elevati valori dei coefficienti di correlazione. In particolare, il Gamma coefficient vede un miglioramento di circa 0.06 unità rispetto a quello del MOCI. Un discorso a parte merita invece la percentuale totale di predizioni corrette. Per il GOCI essa è pari al 27.8%, più bassa del 4.4% rispetto a quella del MOCI ma superiore a quella di PMV e PET (di 0.1% e 2.4% rispettivamente). Il valore conseguito dal MOCI deriva dal fatto che la field survey è stata effettuata a Roma e tale indice era stato calibrato proprio sulle sensazioni termiche di individui residenti nella categoria Cs della classificazione climatica di Köppen-Geiger (cui la zona mediterranea appartiene). Tale indice è inoltre in grado di cogliere aspetti legati all'adattamento: è infatti funzione anche dell'isolamento termico del vestiario, variabile sulla quale le persone agiscono per modificare la propria percezione termica [99].

Con riferimento alla città di Roma (dove la field survey ha avuto luogo), le prestazioni del MOCI rappresentano quindi una sorta di limite superiore per il GOCI. E' chiaro però che, in tale area climatica, le prestazioni di quest'ultimo non potranno mai raggiungere quelle del primo. Sarà possibile esclusivamente un avvicinamento migliorando il suo modello attraverso l'inserimento di relazioni rappresentative di differenti luoghi.

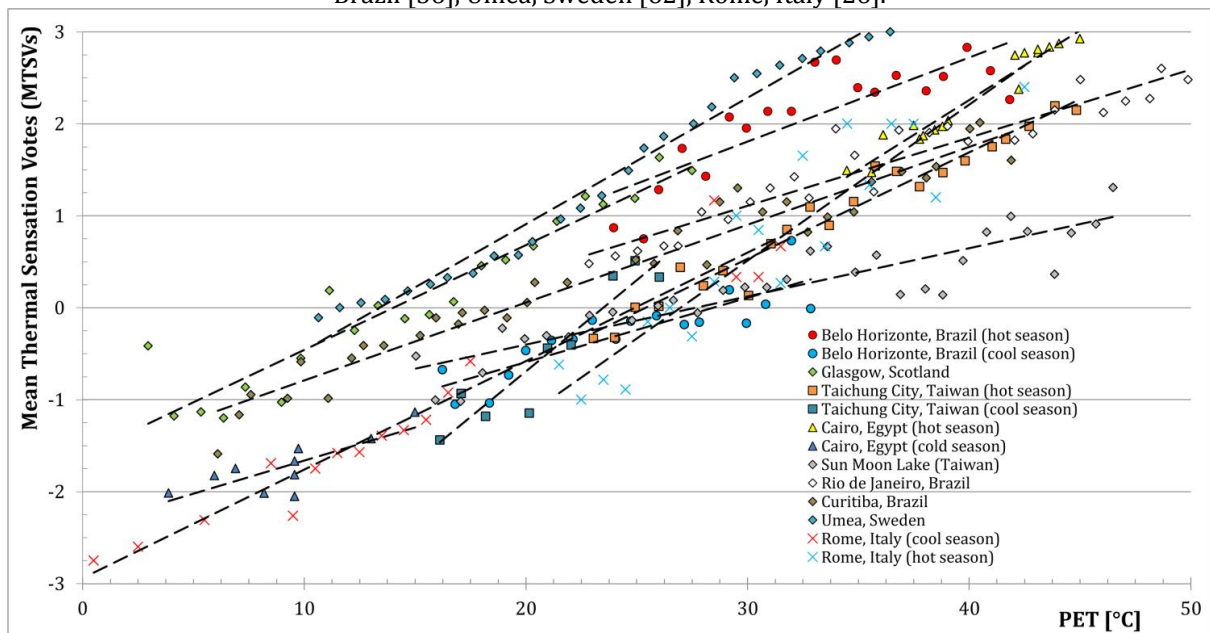
È interessante notare come, qualora inserissimo nell'Eq. (22) i valori di latitudine, temperatura media annuale, temperatura media del mese più caldo e temperatura media del mese più freddo relativi alla città di Roma, otterremmo un valore dell'intercetta pari a -2.372. Esso risulta essere circa 1.3 unità più alto rispetto a quello ottenuto mediante il Mediterranean Outdoor Comfort Index (MOCI). Occorre infatti tenere in considerazione il fatto che quest'ultimo indice è calibrato specificatamente per valutare la percezione termogrometrica della popolazione mediterranea. Il GOCI deriva invece dalla fusione di differenti relazioni. Tra queste vi sono anche quelle rappresentative di città dal clima più freddo e caratterizzate da una popolazione che meglio tollera sollecitazioni termiche connesse a basse temperature. Il valore dell'intercetta è infatti rappresentativo della percezione che si avrebbe qualora, una volta scelta la località, i valori di tutte le altre variabili fossero uguali a zero. Il suo spostamento verso valori caratterizzanti sensazioni termiche di freddo meno intenso denota proprio il contributo, all'interno del modello sviluppato, di queste popolazioni. Chiaramente occor-

rerebbe la situazione inversa qualora ad essere considerata fosse, ad esempio, la città di Sheffield (UK). In base alla Tab. 1.12, l'Actual Sensation Vote derivante dall'impostazione pari a zero di tutte le variabili sarebbe -0.855. Inserendo invece i parametri climatici legati a questa città si otterrebbe un valore dell'intercetta del GOCI pari a -1.546, con un conseguente spostamento verso un valore rappresentativo di una sensazione di maggior freddo. A differenza di quanto avvenuto per la città di Roma (Italia), lo spostamento nel caso di Sheffield (UK) deriva dal fatto che il GOCI annovera nel computo complessivo i contributi di luoghi caratterizzati da un clima caldo come San Paolo (Brasile), l'isola di Creta (Grecia), Tempe (USA)...

Interessante è anche la questione relativa alla temperatura media annuale, alla temperatura media del mese più caldo ed alla temperatura media del mese più freddo: esse infatti sono strettamente correlate a fattori quali aspettativa termica ed acclimatamento e si può vedere, dai coefficienti riportati nella relazione del GOCI (Eq. (22)), come ad un aumento di tali variabili corrisponda una percezione termica associata a sollecitazioni termiche minori in periodi caldi e maggiori in periodi freddi. Tale affermazione trova un riscontro nel fatto che un elevato valore delle temperature medie è spesso sinonimo di un clima non rigido, che porta comunque gli individui a tollerare certe condizioni microclimatiche. La situazione inversa si verifica invece con la latitudine, caratterizzata da un coefficiente con segno positivo.

Come il MOCI rappresenta il limite per le prestazioni del GOCI nella città di Roma, la stessa situazione occorre per tutte le altre città che hanno visto lo sviluppo di una specifica relazione empirica (Tab. 1.12). Ciò è dovuto, come detto in precedenza, al fatto che il GOCI combina i risultati di differenti ricerche (Tab. 1.12). Ad esempio in Fig. 1.13 sono riportati, in funzione della PET, i mean thermal sensation votes delle ricerche che hanno usato l'ASHRAE 7-point scale.

Figura 1.13. Binned mean thermal sensation votes in funzione della PET per le città in cui sono state ricavate relazioni empiriche usando l'ASHRAE 7-point scale: Belo Horizonte, Brazil [60], Glasgow, Scotland [59], Taichung City, Taiwan [27], Cairo, Egypt [28], Sun Moon Lake, Taiwan [35], Rio de Janeiro, Brazil [36], Curitiba, Brazil [36], Umea, Sweden [62], Rome, Italy [26].

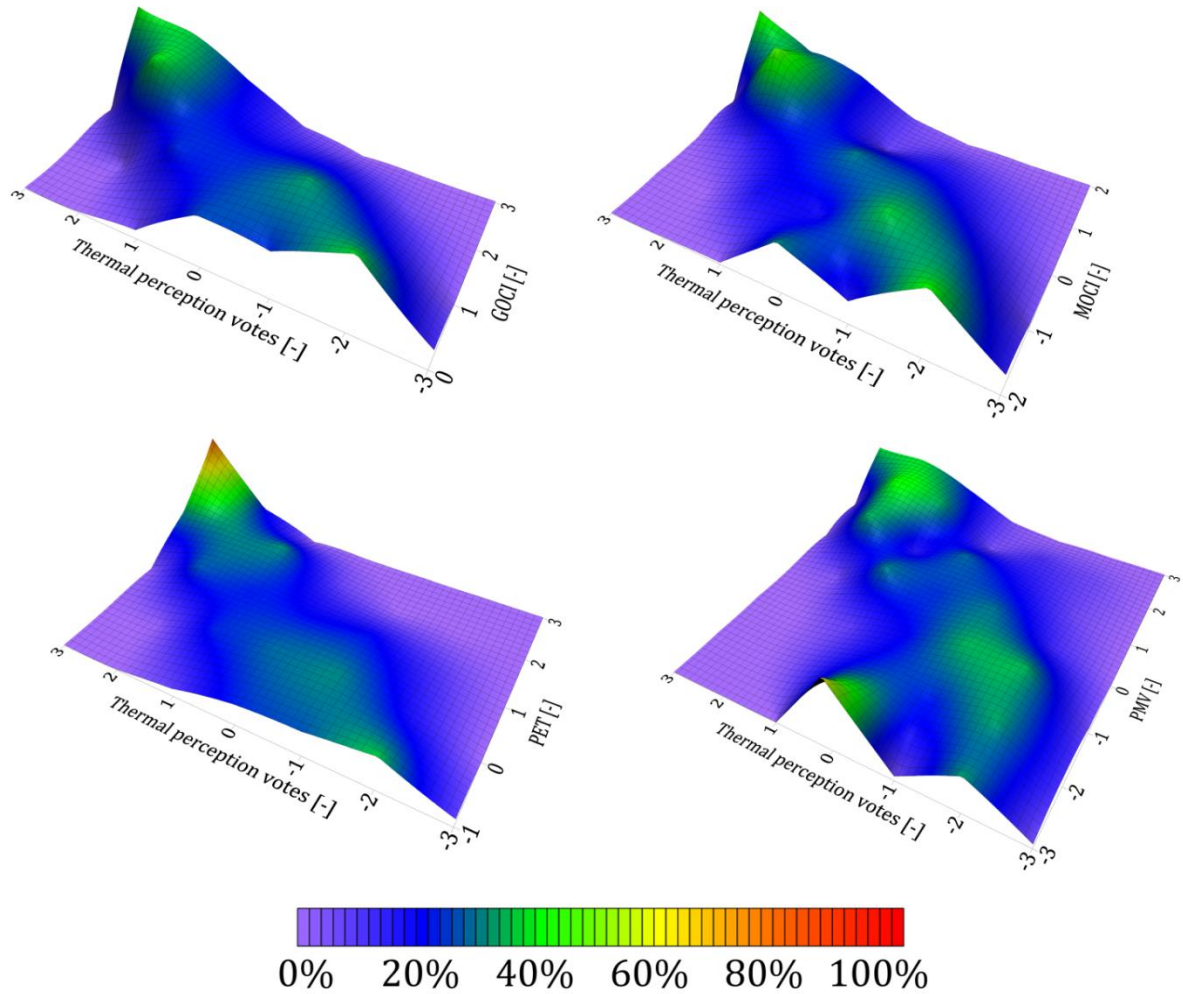


Nel momento in cui effettua una predizione, il GOCI tiene quindi conto allo stesso tempo dei bassi mean thermal sensation votes registrati durante la stagione fredda nella città de Il Cairo (Egypt) e di quelli più elevati registrati, a parità di sollecitazione termica, per Glasgow (Scotland) o Umeå (Sweden).

Occorre però dire che ha il vantaggio di basarsi su relazioni ricavate appositamente in ambienti outdoor. Conseguentemente i suoi valori dei coefficienti di correlazione e della percentuale totale di predizioni corrette sono più alti di quelli della PET o del PMV (nonostante quest'ultimo valuti anche variabili operative come metabolic rate e thermal clothing insulation). Ciò gli permette quindi di essere un utile ed affidabile strumento per la predizione dell'outdoor thermal comfort in tutti quei luoghi che non hanno visto la creazione di un indice empirico.

Le considerazioni fatte fino ad ora trovano poi una conferma analizzando, attraverso una cross-tabulation analysis, la percentuale di predizioni corrette per ciascuna classe degli indici (Fig. 1.14). In questo caso, data una classe di un indice, la somma delle percentuali relative ai vari thermal perception votes deve dare come risultato 100%. Inoltre, la situazione ideale è quella in cui viene registrato il valore 100% in corrispondenza della cosiddetta "linea identità". Per avere quindi la totalità di predizioni corrette, il valore 100% dovrebbe essere rilevato nell'intersezione tra la classe dell'indice -3 ed il thermal perception vote -3, tra la classe dell'indice -2 ed il thermal perception vote -2 e così via.

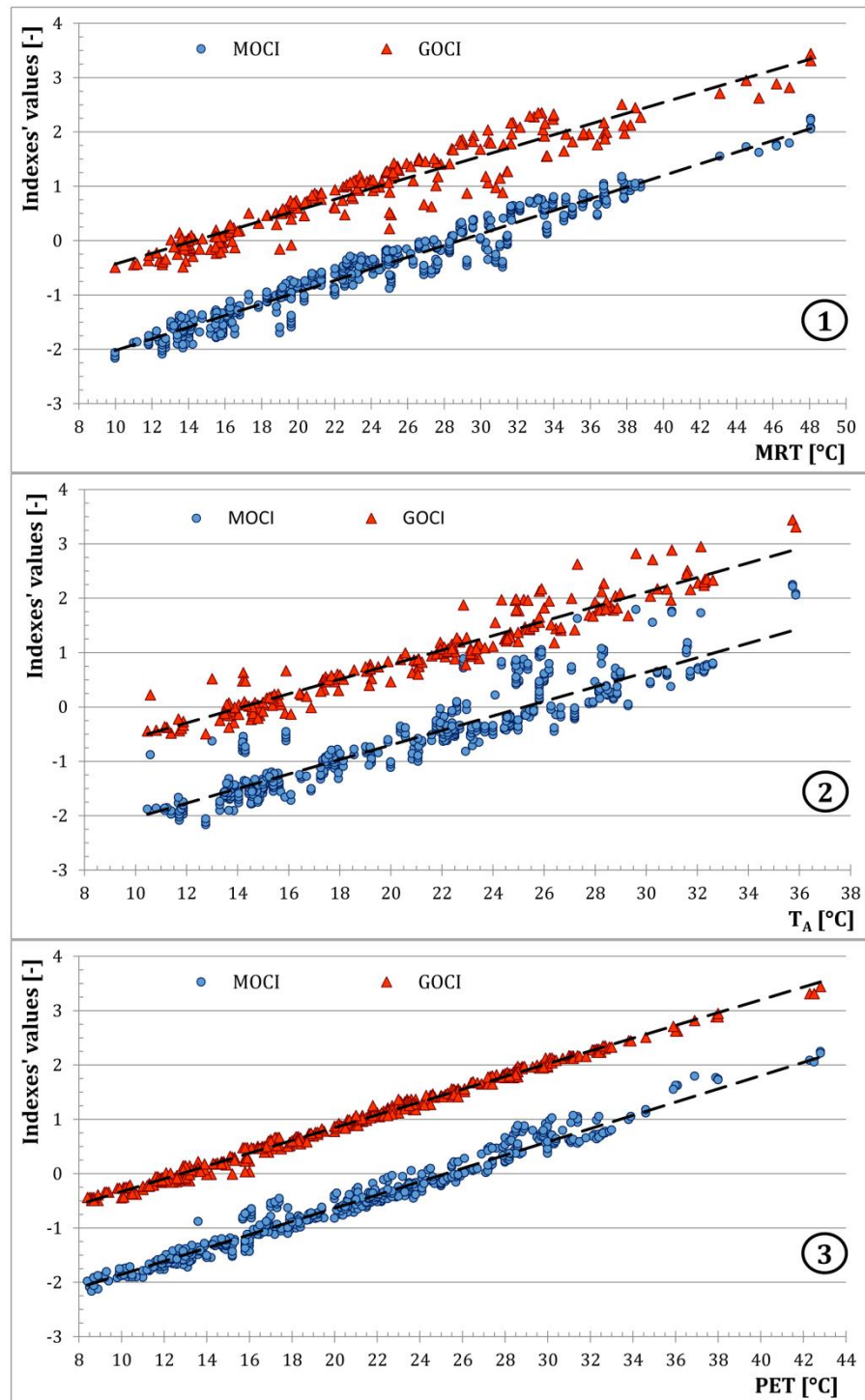
Figura 1.14. Percentuale di predizioni corrette in funzione delle classi di GOCI, MOCI, PET e PMV.



Dai risultati riportati in Fig. 1.14, è possibile notare come il MOCI sia l'indice caratterizzato dalle migliori prestazioni: esso riporta infatti valori sempre superiori al 25% sulla "linea identità". Buoni risultati sono ottenuti anche dal GOCI e dal PMV, con valori di poco inferiori al 40% per le classi +2 e +3. Viene poi confermata la minore abilità predittiva della PET e, da questo punto di vista, non deve trarre in inganno il valore dell'80% ottenuto per la classe +3 e per il thermal perception vote +3. Esso è infatti influenzato dal ridotto numero di occorrenze (5).

Va poi fatto notare come le classi del GOCI vadano da 0 a +3. Come detto in precedenza, questa è una conseguenza dell'inclusione nel modello dell'indice di relazioni empiriche ottenute a seguito di field surveys effettuate in climi freddi. In Fig. 1.15 è possibile osservare come, a parità di sollecitazione termica, il GOCI risulti essere costantemente circa 1.4 unità più alto del corrispondente valore del MOCI. Ciò conduce chiaramente ad una maggiore tolleranza termica verso le basse temperature ed i bassi valori di PET ma, al tempo stesso, ad un aumento dello stress termico stimato in condizioni di caldo.

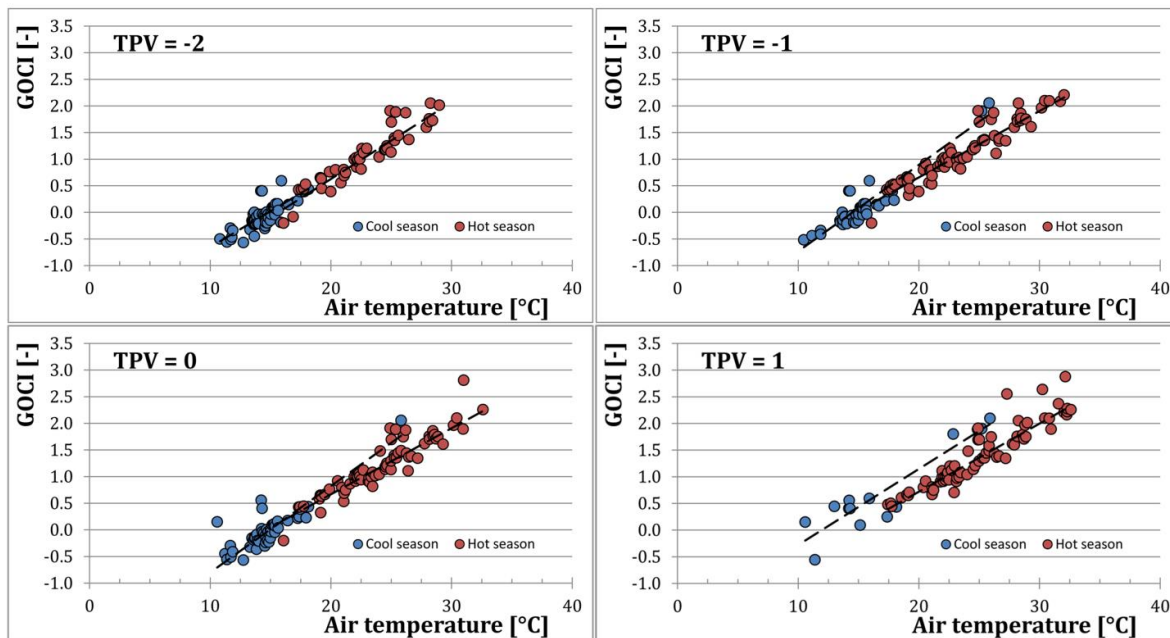
Figura 1.15. Valori assunti dal MOCI e dal GOCI in funzione di mean radiant temperature (1), air temperature (2) and PET (3).



Viene anche valutata, in accordo con quanto fatto da Tseliou et al. [41], l'influenza della temperatura dell'aria e della stagione sulla relazione intercorrente tra i voti dati dagli intervistati ed i valori assunti dal GOCI. Un outdoor thermal comfort index dovrebbe infatti essere caratterizzato da una certa stabilità predittiva in ogni contesto climatico. Ad esempio, se gli intervistati giudicano

l'ambiente termico con il perception vote -1, i corrispondenti valori del GOCI dovrebbero essere nell'intervallo compreso tra -1.5 e -0.5. Dovrebbe quindi esserci una certa congruenza tra i vari thermal perception votes ed i corrispondenti intervalli del GOCI. Tuttavia, come è possibile notare in Fig. 1.16, questo accade prevalentemente durante la stagione fredda per il thermal perception vote 0 e durante la stagione calda per il thermal perception vote +1.

Figura 1.16. Dipendenza stagionale del GOCI in funzione della temperatura dell'aria per le classi di thermal perception votes (-2), (-1), (0) e (+1).



Negli altri casi una certa influenza della temperatura e dei fenomeni connessi ad adattamento ed acclimatamento è riscontrata. Questo conferma parzialmente i risultati ottenuti da Tseliou et al. [41] per PET, Temperature-Humidity Index (THI) e Wind Chill Index (K). E' inoltre interessante notare come, per il range (-1)-(+1), la pendenza della retta di regressione per la stagione calda è leggermente superiore a quella relativa al periodo estivo, evidenziando una maggiore sensibilità delle persone. Va infine detto che non sono stati discussi i thermal perception votes (+2) e (+3) perché non vi erano abbastanza occorrenze per la stagione fredda e viceversa per il thermal perception vote (-3).

2. OUTDOOR THERMAL COMFORT, STRATEGIE DI MITIGAZIONE E MATERIALI INNOVATIVI

2.1. Introduzione

Più di metà della popolazione mondiale vive nelle città e tale percentuale arriva al 75% nei paesi più industrializzati [100]. Si tratta comunque di percentuali in crescita, soprattutto nei paesi in via di sviluppo [100], molti dei quali sono nell'area tropicale. A testimonianza di tale crescita, in Cina la popolazione urbana aumenta più di $1 \cdot 10^6$ di individui ogni anno [101]. Appare chiara la necessità di poter studiare le caratteristiche del microclima nelle aree urbane, data l'elevata percentuale di persone esposte alle sollecitazioni termiche in tali zone.

Il continuo sviluppo delle città e la mancanza di attenzione nella pianificazione degli spazi aperti hanno un forte impatto sul microclima urbano: l'effetto isola di calore, che l'eccessiva antropizzazione dell'ambiente comporta, genera un aumento della temperatura che influenza il benessere e la salute degli individui. Chi frequenta uno spazio aperto necessita di una situazione ambientale che garantisca il comfort termico per svolgere agevolmente la propria attività [102]; condizioni non ottimali si ripercuotono sulle attività umane e sociali e quindi sull'economia di tali aree [103]. Fenomeni di surriscaldamento delle aree urbane, influenzati dal design dello spazio urbano e dai materiali adoperati devono quindi essere mitigati [104]. Per fare ciò possono essere adoperate differenti strategie: esse risultano essere in parte collegate tra loro e consistono nell'uso di superfici con elevato coefficiente di albedo [105][106], di superfici con meccanismi di evapotraspirazione [107][9], di superfici vegetate [108] ed alberi [109][110][111][112].

La progettazione di uno spazio aperto da un punto di vista microclimatico necessita infatti di una verifica che garantisca prestazioni rispondenti a condizioni di comfort termico [113]. Tale verifica ha l'obiettivo di valutare se risultano efficaci le strategie messe in atto per controllare gli effetti delle proprietà termofisiche delle superfici dei materiali presenti sul microclima e necessita di strumenti sofisticati che simulino le variabili climatiche di un particolare sito. Solo negli ultimi tempi stanno operando in quest'ottica urbanisti, architetti ed ingegneri, anche se il problema è noto da tempo, come riportano studi di climatologia urbana ormai datati [114].

Questo ritardo negli studi dell'ambiente esterno è legato alla sua complessità causata dalla modellizzazione della fisica dell'ambiente urbano esterno e che porta ad un elevato numero di variabili coinvolte, spesso mutuamente influenzate tra loro. Effettuare campagne di misura sperimentali sul campo risulta essere troppo dispendioso in termini di tempo e risorse. Per questa ragione le simulazioni numeriche risultano essere il metodo più adatto per ottenere la previsione della prestazione ambientale dello spazio urbano e per poter valutare e migliorare il microclima all'esterno [115][116] come frutto della relazione tra queste variabili e i parametri morfologici che emergono dal progetto.

La necessità di studiare il microclima è avvalorata anche dagli effetti che l'ambiente microclimatico può comportare sui fabbisogni energetici [117]. Uno studio [118] ha dimostrato che in estate il carico di raffrescamento di un edificio caratterizzato dalla presenza di uffici ed ubicato nell'area metropolitana di Hangzhou in Cina aumenterebbe del 10.8% a seguito di un incremento della temperatura dell'aria di 0.5 K. Altri studi hanno rilevato che un incremento della temperatura dell'aria di 1 K porta ad un aumento del consumo di energia elettrica nelle città degli Stati Uniti del 2-4% e

che il 5-10% dell'energia elettrica nelle aree urbane è speso per raffrescare gli edifici per compensare aumenti della temperatura dell'aria di 0.5-3.0 K [106].

Nell'area mediterranea uno studio [119] ha rilevato che negli ultimi 40 anni, in un tipico edificio per uffici in Grecia, il carico di riscaldamento è diminuito di circa 1 kWh/m² per decade mentre il carico di raffrescamento è aumentato di circa 5 kWh/m² per decade.

Investigare l'ambiente urbano attraverso simulazioni numeriche può quindi essere molto utile sia per finalità di risparmio energetico che di benessere termoigrometrico. Analizzare e valutare la percezione termica degli individui può essere infatti molto utile nel migliorare l'ambiente in cui le persone vivono attraverso un'appropriata pianificazione delle città [120] ed un'accurata selezione dei materiali per la costruzione di aree non confinate [9]. Spazi esterni correttamente progettati migliorano il microclima dell'area e diminuiscono l'entità del potenziale stress termico, aumentando le attività outdoor [121]. Tutto ciò porta a ripercussioni positive attraverso una diminuzione del cosiddetto Urban Heat Island effect.

In particolare, in questo studio viene analizzato ed utilizzato il software ENVI-met [122]: esso è forse il software più diffuso nel valutare il microclima e l'impatto dell'ambiente costruito. Esso è stato infatti usato in vari studi per valutare, in termini di condizioni biometeorologiche, differenti layout urbanistici. Valuta ad esempio la traspirazione, l'evaporazione ed il flusso di calore sensibile dalla vegetazione all'aria includendo una simulazione completa di tutti i parametri fisici associati alla pianta (come ad esempio la fotosintesi). È in grado di analizzare anche gli scambi di calore e massa in corrispondenza delle varie superfici: inserisce ad esempio la quantità d'acqua assorbita dalla pianta nel bilancio del terreno.

È per tale ragione che esso è stato usato prevalentemente per valutare l'influenza dello urban greening su variabili micrometeorologiche ed outdoor thermal comfort. Lee et al. [123] hanno ad esempio stimato cosa comporta la presenza di verde sul microclima di un tipico distretto residenziale di Friburgo (Germania). Differentemente, Duarte et al. [124] hanno simulato, con riferimento ad un sito collocato nella città di San Paolo (Brasile), un parco collocato centralmente al sito, piccoli parchi disseminati in modo regolare nel tessuto urbano ed alberi collocati a bordo strada. Sono stati studiati più scenari anche da Tsilini et al. [125]: essi hanno ipotizzato nella città di Chania (Grecia) una configurazione senza vegetazione, una rappresentativa della situazione corrente, una con piante derivanti dall'orticoltura ed una con specie aromatiche e medicinali, registrando negli ultimi due casi un decremento della temperatura superficiale di 10 °C. La stessa variabile è stata analizzata da Skelhorn et al. [126]: essi hanno trovato per Manchester (UK) come un incremento del 5% negli alberi a foglia caduca può ridurre la temperatura superficiale media di circa 1 °C durante una giornata estiva. Müller et al. [127] hanno invece concluso, attraverso una ricerca che ha avuto luogo ad Oberhausen (Germany), come la strategia di mitigazione più efficace è quella che vede parchi con alberi elevati, caratterizzati da distinct crown layer ed in grado di ombreggiare (ma al tempo stesso non inibire la velocità del vento). Morakinyo and Lam [128] hanno poi valutato, con riferimento alla città di Hong Kong, gli effetti derivanti da differenti valori di green coverage, Leaf Area Density (LAD) e Leaf Area Index (LAI). Uno studio simile è stato effettuato a Phoenix (USA) da Middel et al. [129]: sono stati implementati vari scenari, caratterizzati da differenti livelli di canopy cover (da 0% a 30%), ed è stato trovato che per ogni punto percentuale di aumento si ha un decremento della tem-

peratura all'altezza di 2 m di 0.14 °C. Ketterer and Matzarakis [130], nel loro studio effettuato a Stoccarda (Germany), hanno invece concentrato la loro attenzione sulla Physiological Equivalent Temperature (PET) ed hanno stimato, a seguito di un aumento del numero di alberi, un decremento della PET di 0.5 °C alle 22 e un decremento massimo di 27 °C alle 14. Significativa è l'influenza dei sistemi di comfort passivi anche nella città di Hangzhou (China): Shen et al. [118] hanno ottenuto un incremento della temperatura dell'aria di 0.5 °C e del carico di raffrescamento di un tipico edificio adibito ad uffici del 10.8% qualora le aree di West Lake e di Xixi Wetland venissero rimosse. Tali risultati sono in accordo con quelli ottenuti da Wang and Zacharias [131]: nella città di Pechino (China), essi hanno ipotizzato di effettuare interventi di riqualificazione urbana e, se parte delle infrastrutture stradali esistenti sono sostituite da vegetazione e terreni permeabili, si avrebbe una diminuzione della temperatura dell'aria compresa tra 0.5 °C ed 1 °C.

In altri studi sono state valutate, oltre alla vegetazione, anche caratteristiche morfologiche. Ghaffarianhoseini et al. [132] hanno valutato a Kuala Lumpur (Malaysia) l'outdoor thermal comfort in unshaded courtyards al variare di orientamento, altezza, albedo delle pareti e presenza di vegetazione. Ketterer and Matzarakis [133] hanno studiato anche aspetti legati ai canyon urbani ed hanno trovato che lo stress termico può essere ridotto in un canyon caratterizzato da un orientamento NW-SE e da un rapporto di forma di almeno 1.5. Middel et al. [134] hanno invece combinato a differenti Local Climate Zones (LCZs) le tre tipologie prevalenti di zona residenziale nell'area metropolitana di Phoenix (USA) mettendo in luce come aree dense possono portare alla formazione di local cool islands. Gli effetti di densità urbana, altezza degli edifici e vegetazione sono stati valutati anche da Perini and Magliocco [135] nelle città di Roma, Genova e Milano; essi hanno in particolare concluso che la vegetazione riesce a svolgere la sua funzione mitigatrice al meglio in presenza di edifici alti, temperature elevate e bassi valori di umidità relativa. Differentemente, Yahia and Johansson [136] hanno riscontrato come vegetazione ed elementi topografico-morfologici possano portare a valori prossimi a quelli di comfort termico in estate per strade con orientamento E-W e N-S.

Interessanti studi hanno riguardato poi interventi effettuati relativamente ai roofs. Wang et al. [137] hanno ad esempio valutato l'impatto, per differenti layout urbanistici a Toronto (Canada), di varie strategie di mitigazione del microclima quantificando l'influenza dei cool roofs in funzione della tipologia di area in cui sono implementati. Wang and Akbari [138] hanno invece esaminato le conseguenze sul microclima derivanti dall'uso di vari materiali per ground, walls e roofs e, per rappresentare le condizioni ambientali, è stato definito un "Thermal Radiative Power" (TRP). La soluzione dei cool roofs è stata valutata anche in città di dimensioni minori: per esempio è stata analizzata a Teramo da Ambrosini et al. [139] con riferimento ad un centro storico e ne è stata rilevata la sua scarsa influenza a livello dei pedoni, anche a seguito di un incremento dell'albedo da 0.3 a 0.9.

Altre ricerche hanno implementato invece la soluzione dei green roofs. Anche in questo caso sono state coperte aree con differenti caratteristiche climatiche: Adelaide (Australia) [140], Bilbao (Spain) [141], Tehran (Iran) [142]. In particolare, quest'ultimo studio [142] ha visto l'implementazione di uno scenario ibrido che combina vegetazione, green roofs e materiali con elevato coefficiente di albedo ed è stato quantificato un effetto di raffrescamento notturno medio di 1.1 °C. Un approccio simile è stato adottato da Peron et al. [143] a Venezia (Italy): in questo caso l'uso contemporaneo di cool materials e vegetazione conduce ad un decremento di 4 °C. Materiali ad ele-

vato albedo sono stati usati anche da Song and Park [144] a Changwon City, South Korea e da O'Malley et al. [145] presso il Seagrave site, a Londra (UK): è stato tuttavia interessante notare come, in questo ultimo caso, essi hanno anche considerato la strategia di mitigazione delle urban inland water bodies. È poi significativo, esaminando la microscala, come Taleghani et al. [146] hanno aumentato l'albedo della Shattuck Hall bare courtyard nel campus universitario di Portland (USA) e come questo ha comportato un aumento della temperatura media radiante di 2.9 °C ed una diminuzione di quella dell'aria di 1.3 °C. Variazioni nei materiali costituenti il tessuto urbano hanno caratterizzato anche le ricerche di Yang and Lin [147] a Tainan (Taiwan), di Kim et al. [148] a Seul (South Korea) e di Salata et al. [9][7] a Roma: nel primo caso è stato studiato un nuovo tipo di bricks, nel secondo sono state proposte differenti soluzioni per varie superfici mentre nel terzo è stato testato un nuovo tipo di materiale per involucro edilizio e superficie di calpestio.

Differente è stato lo scopo del lavoro di Jänicke et al. [149]: il sito studiato è il campus del Berlin Institute of Technology (Germany) e, per valutare l'effetto derivante dal verde parietale, è stata costituita una facciata coperta su metà della superficie da piante. Come risultato, è stato calcolato un decremento medio della temperatura media radiante di fronte alla porzione di facciata con vegetazione di circa 2 °C.

Altri studi si sono concentrati invece esclusivamente su aspetti topografici e morfologici. Ad esempio Johansson et al. [150] hanno considerato una tipica giornata estiva a São Paulo (Brazil) e hanno analizzato le variazioni delle variabili micrometeorologiche in sei differenti tipi di tessuti urbani. Taleb and Taleb [151] hanno preso come caso studio la Dubai International Academic City (United Arab Emirates) e hanno simulato differenti scenari in termini di orientamento e di direzione del vento. E' emerso come lo scenario più favorevole è quello che permette una certa penetrazione del vento, andando a portare un miglioramento del Predicted Mean Vote (PMV) a livello dei pedoni. Qaid and Ossen [152] hanno poi messo in luce come a Putrajaya Boulevard (Malaysia) un canyon urbano con un orientamento NE-SW ed un rapporto di forma di 2-0.8 riduce la temperatura delle superfici di 10-14 °C e quella dell'aria di circa 4.7 °C. Taleghani et al. [153] hanno invece analizzato il microclima e l'ambiente termico derivante da differenti forme urbane in Olanda. È emerso in particolare come la confidurazione del courtyard conduce alle migliori condizioni termoigrometriche durante il periodo estivo.

Altre ricerche hanno infine valutato le prestazioni del software. Acero and Herranz-Pascual [154] hanno evidenziato come le differenze tra i valori delle variabili misurati sperimentalmente e quelli forniti da ENVI-met influenzano, a volte in maniera rilevante, i valori della PET. Park and Tuller [155] hanno confrontato i valori sperimentalmente misurati dello sky view factor con quelli forniti dal software, riscontrando una sottostima da parte di ENVI-met di circa il 3.9%. Chen et al. [156] hanno focalizzato la loro attenzione sulla capacità di ENVI-met di predire la temperatura media radiante ed hanno calcolato un valore dell' R^2 di 0.25 con i risultati forniti dal cosiddetto "six direction radiation method". Infine Park et al. [157] hanno usato ENVI-met per determinare la velocità del vento a Nanaimo (Canada) e Changwon (Republic of Korea) ed è stata rilevata una differenza media rispetto ai valori sperimentalmente misurati di -0.52 ± 0.17 .

A valle di ciò va però detto che il software ENVI-met necessita di model input parameters che sono difficilmente reperibili ed in grado di assicurare una corretta simulazione della fenomenologia

reale. Nella presente sezione questi vengono quindi trattati in modo dettagliato e parallelamente sono date informazioni sulla base teorica del programma. Per ogni model input parameter, vengono dati anche riferimenti (websites, papers pubblicati su peer-review journals, etc...) dove reperire i valori numerici da inserire in ENVI-met per una data giornata o luogo. Il processo di calibrazione di modelli realizzati mediante il suddetto software è infine discusso attraverso l'implementazione di un caso studio. I valori forniti come output dal software in termini di variabili micrometeorologiche e PMV sono confrontati con quelli sperimentalmente misurati e sono state considerate anche differenti cell sizes per valutare come queste influenzano l'accuratezza dei risultati.

2.2. La taratura del modello

Mediante l'operazione di calibrazione si cerca di ottenere la miglior accuratezza possibile dal modello che riproduce un fenomeno del mondo reale.

Una buona calibrazione richiede di eliminare, o ridurre al minimo, gli errori nella raccolta dei dati e di scegliere un modello teorico che sia la miglior descrizione possibile della realtà. Decisiva è inoltre la scelta dei parametri del modello, che va fatta in modo tale da minimizzare lo scostamento dei suoi risultati quando siano confrontati con valori effettivamente misurati sul campo.

Tale fase prevede diverse giornate di misurazioni all'interno del chiostro mediante la centralina microclimatica e mediante il piranometro. Sarà così possibile rilevare per ogni ora (viene scelto tale intervallo temporale in accordo con quelli che sono i valori degli output di ENVI-met, dati proprio allo scadere di ogni ora reale simulata) la velocità del vento, l'umidità relativa, la temperatura dell'aria, la temperatura media radiante e l'irradiazione globale.

Tali valori verranno poi in un secondo momento confrontati con quelli in uscita dal software proprio per vedere se il modello costruito riproduce in maniera soddisfacente la fenomenologia.

Chiaramente la posizione in cui si effettuerà il post-processing e si valuteranno i valori delle variabili agli istanti considerati (con riferimento agli output del software) risulterà essere coincidente con quella in cui ci si è posti all'interno del chiostro per i rilievi sperimentali.

Nella sezione che segue si discutono le modalità mediante le quali si è proceduto alla realizzazione del modello attraverso il software delineando le caratteristiche dello stesso nell'“Area Input File” prima e nel “Configuration File” poi.

Relativamente a quest'ultimo saranno poi definite tutte le variabili introdotte e la scelta relativa ai valori delle stesse sarà in ogni caso motivata. Viene inoltre proposto un nuovo approccio simulativo basato su dei dati rilevati attraverso radiosondaggi.

Si precisa infine che, sebbene la scelta degli input parameters viene discussa con riferimento al giorno 13 febbraio 2014, le misure sperimentali sono state effettuate anche per il 6 febbraio 2014, il 21 maggio 2014, il 7 agosto 2014 ed il 3 ottobre 2014. Ciò ha permesso di testare le abilità predittive del software con riferimento ad una più ampia varietà di condizioni meteorologiche.

2.3. Il sito studiato

Il caso studio ha riguardato il chiostro (Fig. 2.1) adiacente alla Basilica di San Pietro in Vincoli e si trova nel centro storico di Roma. Il chiostro fa parte del complesso che oggi è la sede della Facoltà di Ingegneria dell'Università degli Studi di Roma “Sapienza”; è situato nel centro storico, nei pressi del Colosseo. Esso risale al periodo rinascimentale ed è attribuito a Giuliano da Sangallo: ha pertanto

un elevato valore storico-artistico. Presenta al piano terreno un portico rettangolare con i lati di sette/otto archi sostenuti da colonne. Al centro del cortile figura un pozzo dalla pianta ottagonale, attribuito a Simone Mosca. E' sormontato da un semplice cavalletto formato da due coppie di colonne sostenenti un architrave da alcuni attribuita a Michelangelo Buonarroti. Nel cortile, caratterizzato da ciottoli di provenienza lombarda, è presente inoltre una fontana ed un albero di arancio. Per la pavimentazione del porticato sono state invece adoperate piastrelle di ceramica.

La configurazione descritta è quella originaria che il chiostro ha assunto nuovamente a seguito dell'ultima ristrutturazione edilizia operata; in precedenza nel cortile figurava infatti un tipico giardino all'italiana.

Il presente studio prende le mosse proprio dall'idea di voler esaminare le differenze delle variabili microclimatiche a seguito degli interventi ed ha inoltre il proposito di valutare l'influenza di materiali innovativi sul benessere termoigrometrico.

Figura 2.1. Configurazione attuale del chiostro della Facoltà di Ingegneria dell'Università degli Studi "Sapienza".



2.4. Area Input File

Questo è uno degli elementi più importanti quando si lavora con ENVI-met e le informazioni che possono essere date mediante l'“Area Input File” includono:

- la posizione e l'altezza degli edifici;
- posizione degli elementi costituenti la vegetazione;
- la distribuzione dei materiali con riferimento alle varie superfici ed alla tipologia di terreno;
- la posizione delle sorgenti;
- la posizione dei ricevitori;
- i collegamenti a database opportunamente editati;
- la posizione geografica della località;
- il numero di “Nesting Grids”;
- le informazioni relative al terreno costituente le “Nesting Grids”;
- la rotazione del modello costruito rispetto al Nord.

Ogni “Area Input File” è poi costituita dalle seguenti sezioni in ordine fisso che verranno discusse nei paragrafi successivi:

- File Header;
- Main Section II: Buildings and Plants;
- Main Section III: Buildings Bottoms;
- MainSection IV: Soils.

2.4.1. File Header

Esso contiene le informazioni basilari per costruire il modello e relative alle dimensioni dello stesso (Fig. 2.2).

Queste risulteranno essere le medesime sia per la configurazione attuale del chiostro che per le altre considerate (configurazione con tipico giardino all’italiana, con rivestimento sulla superficie di calpestio, con rivestimento sulle pareti degli edifici e presenza del giardino all’italiana).

Figura 2.2. Schermata relativa al “File Header” e valori in esso inseriti.

The screenshot shows a software interface for configuring a model area. It is divided into several sections:

- Number of grids and nesting properties:**
 - Main model area: x-Grids: 27, y-Grids: 30, z-Grids: 29
 - Nesting grids around main area: N° of nesting grids: 3
 - Soil profile ID for nesting grids:
 - Soil A: s <Asphalt Road>
 - Soil B: I <Loamy Soil>
- Grid size and structure in main area:**
 - Size of grid cell in meter: dx= 2.00, dy= 2.00, dz= 0.50 (base height)
 - Method of vertical grid generation:
 - ☐ equidistant (all dz are equal except lowest grid box)
 - ☒ telescoping (dz increases with height)
 - Telescoping factor (%): 20
 - Start telescoping after height (m): 3.00
- Geographic Properties:**
 - Model rotation out of grid north: 70.00
 - Location on earth:
 - Name of location: rome/Italy
 - Position on earth:
 - Latitude (deg. +N, -S): 41.54
 - Longitude (deg. -W, +E): 12.30
 - Reference time zone:
 - Name: CET/GMT+1
 - Reference longitude: 15.00
 - Georeference:
 - Co-ordinate of lower right grid:
 - x-value: 0.00
 - y-value: 0.00
 - Reference system: <plane>
- Model area description:** Chiostro della Facoltà di Ingegneria della Sapienza con risoluzione di 2 m

Buttons on the right: Create new area, Apply changes, Cancel.

La prima informazione che viene data è quella relativa al numero di celle lungo gli assi coordinati. A tal proposito, tenuto conto delle dimensioni reali del Chiostro determinate mediante rilievi sul campo e del fatto che lungo gli assi x ed y è stata adottata una risoluzione di 2 m, sono state impostate 27 celle lungo l’asse delle ascisse e 30 lungo quello delle ordinate.

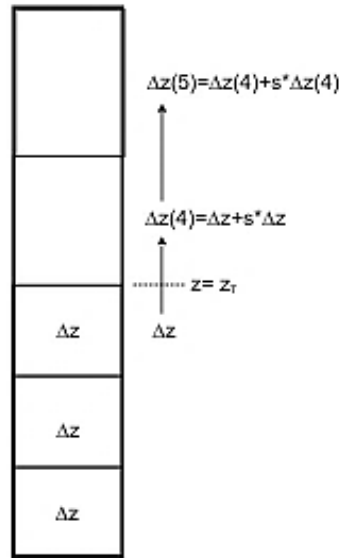
Il discorso risulta essere diverso per l’asse z. In questo caso infatti le celle impostate sono state 29 (30 è il numero massimo consentito) per scongiurare qualsiasi fenomeno di bordo dovuto alla vicinanza del limite superiore del modello al Chiostro. Inoltre è stata impiegata una griglia di tipo telescopico: a tal proposito è stata specificata l’altezza della cella di base (0.50 m) e l’altezza (3.00 m) al di sopra della quale entra in gioco il fattore di estensione, impostato al 20%. Ciò significa che fino all’altezza di 3.00 m la singola cella avrà dimensioni 2.00 m x 2.00 m x 0.50 m per cercare, così facendo, di investigare compiutamente lo spazio in cui l’uomo si muove (si tenga conto del fatto che

l'altezza media della popolazione italiana, per la fascia di età compresa tra 18 e 40 anni, risulta essere di 1.68 m). Al di sopra invece di 3.00 m l'altezza della singola cella risulta essere determinata in accordo con la relazione seguente (Eq. (23)):

$$\Delta z(k) = \Delta z(k - 1) + s \cdot \Delta z(k - 1) \quad (23)$$

Si vede pertanto come entri in gioco anche il suddetto fattore di estensione s e ciò permette di continuare ad avere un' altezza della cella relativamente piccola fino al valore di z corrispondente alla parte superiori degli edifici costituenti il modello (Fig. 2.3). Per valori di z superiori a quest'ultimo invece è possibile adoperare valori di Δz crescenti dal momento che l'importanza delle informazioni, nello studio seguente, risulta essere inversamente proporzionale all'altezza a cui le stesse sono determinate (nonostante uno dei parametri più importanti da impostare nel "Configuration File" sia la temperatura potenziale a 2500 m di altezza).

Figura 2.3. Esempio di griglia telescopica adottata nel modello.



Sono poi state inserite 3 "Nesting Grids" con lo scopo di creare una sorta di zona atta ad allontanare in direzione x ed y i limiti del modello da quelli relativi alla struttura del Chiostro al fine di prevenire fenomeni di instabilità numerica. È stato inoltre scelto di non riportare negli output i calcoli relativi alle "Nesting Grids" e si ricorda come la dimensione di queste ultime risulti essere direttamente proporzionale alla distanza delle stesse dal centro del modello; a tal proposito la relazione rappresentativa della dimensione dxy_{n+1} della cella costituente la $n+1$ -esima "Nesting Grid" risulta essere la seguente (Eq. (24)):

$$dxy_{n+1} = dxy_n + dxy_{main} \quad (24)$$

dove dxy_n è la dimensione della "Nesting Grid" immediatamente precedente a quella considerata e dxy_{main} è la risoluzione del modello principale.

È poi richiesto di introdurre anche delle informazioni relativamente alla tipologia di terreno che circonda il Chiostro e che quindi risulta essere quello caratterizzante la “Nesting Grid”: possono infatti essere introdotti due differenti tipi di terreno, indicati nella schermata relativa al “File Header” con “Soil A” e “Soil B”.

Per il sito studiato, data la vicinanza allo stesso del Parco di Colle Oppio e di numerose strade ed abitazioni, si è scelto di adottare come “Soil A” un terreno impermeabile identificato dall’ID “s” e denominato “Asphalt Road” mentre come “Soil B” un terreno permeabile individuato dall’ID “I” e denominato “Loamy Soil”.

Il passo successivo è stato quindi quello che ha portato alla definizione dell’angolo di cui il modello deve essere ruotato in senso orario rispetto al Nord per essere correttamente orientato. Dallo studio del sito emerge che si deve avere una rotazione di 70°.

Tra le numerose località presenti nel database di ENVI-met, viene quindi impostata la città in cui sorge il sito esaminato: Roma. Conseguenza della scelta di quest’ultima è il valore della longitudine e della latitudine e quello relativo alla differenza in termini di orario con il GMT (Greenwich Meridian Time).

2.4.2. Main sections II/III: Buildings and Plants/Buildings Bottoms

Il passo successivo è di natura meramente grafica. Si procede infatti alla riproduzione del Chiostro mediante il software a guisa di avere l’“Area Input File” da inserire in un secondo momento nel “Configuration File” per effettuare la simulazione.

Dopo aver ottemperato a tutte le richieste del “File Header”, si ha una griglia composta da 27 x 30 celle sul piano xy. Queste sono chiaramente quelle necessarie alla riproduzione del sito studiato considerando una risoluzione lungo gli assi x ed y di 2 m.

Si costruisce quindi la struttura del Chiostro cominciando dalle porzioni esterne dello stesso, aventi altezza pari a 17.00 m. A tal proposito sono stati riprodotti nella geometria i volumi delle stanze che si affacciano sull’ambiente esaminato al fine di non trascurarne l’eventuale influenza sul benessere termoigrometrico. In tale versione di ENVI-met infatti è possibile andare ad impostare la temperatura degli ambienti interni e la trasmittanza delle pareti che separano questi dall’esterno.

È stato poi inserito il portico, che può essere considerato uno spazio di transizione tra interno ed esterno, impostandone l’altezza da terra della sua parte inferiore pari a 5.00 m e quella della sua parte superiore a 12.00 m, come da rilevazione sul campo.

Sono stato inoltre riprodotti, collocandoli opportunamente rispetto alla struttura, il pozzo e la fontana.

Si passa quindi allo studio della vegetazione presente: tale fase risulta essere estremamente delicata in virtù di tutti i processi che governano le interazioni tra eventuali piante ed ambiente esterno ed in virtù del confronto tra l’attuale configurazione della sede di Ingegneria e quelle che vedono la presenza del giardino.

Nella prima l’unica pianta che compare è un’arancio, opportunamente editata in un “Local Database” in quanto assente in quello principale di ENVI-met.

Sono stati quindi inseriti i seguenti dati ad essa relativi (Tab. 2.1):

Tabella 2.1. Caratteristiche relative alla tipologia di pianta “arancio” editata nel “Local Database”.

ID	C?	TY	$r_{s,min}$ [sec ^{0.5} m ⁻¹]	α_f [ad]	z_p [m]	Profondità delle radici nel terreno z_r [m]
ar	C3	01	400	0.20	8.00	2.00

Nella prima colonna della tabella riportata si ha l’ID relativo a tale tipologia di pianta, che permette quindi di sceglierla durante la costruzione dell’ “Area Input File”.

Nella seconda colonna invece viene riportata la sigla C3 relativa alla produzione di CO₂.

Con TY = 01 si procede alla classificazione della pianta stessa; in questo caso la scelta era tra TY = 01 (latifolia), TY = 02 (conifera) e TY = 03 (erba). Sebbene l’arancio sia una pianta sempreverde è stato scelto il valore 01 relativo alle latifoglie perché tale informazione è usata per calcolare la dimensione delle foglie e la resistenza aerodinamica delle stesse.

Con $r_{s,min}$ si individua poi la minima resistenza degli stomi, impostata pari a 400 sec^{0.5}m⁻¹ in quanto si ha a che fare con un albero mentre per il coefficiente di albedo delle foglie α_f è stato stabilito il valore di 0.20.

L’altezza z_p = 8.00 m della pianta è stata rilevata in accordo con le misurazioni effettuate sul campo mentre la profondità delle radici nel terreno è stata determinata attraverso la valutazione dei valori impostati in ENVI-met per piante aventi la medesima altezza dell’arancio editato.

È stato inoltre necessario andare a determinare i corretti valori della “Leaf Area Density” in funzione dell’altezza della pianta cui si fa riferimento.

A tal fine la pianta è stata considerata divisa in 10 blocchi, ognuno dei quali avente altezza pari ad 1/10 di quella complessiva relativa all’arancia presa in esame e per ognuno di questi si è determinato il corretto valore della *LAD* (tabella 107) da cui in un secondo momento il software ricava il “Leaf Area Index” (*LAI*).

Per far ciò si è fatto ricorso a delle relazioni empiriche che risultano dare buoni risultati se confrontati con quelli derivanti dall’osservazione diretta delle specie vegetali considerate (Eq. (25)):

$$LAD(z) = LAD_m \left(\frac{z_p - z_m}{z_p - z} \right)^n \exp \left[n \left(1 - \frac{z_p - z_m}{z_p - z} \right) \right] \quad (25)$$

dove LAD_m è il massimo valore della “Leaf Area Density” riscontrato all’altezza z_m , z_p è l’altezza totale della pianta esaminata, z è l’altezza alla quale si vuole determinare $LAD(z)$ ed n risulta essere pari a 6 per $0 \leq z \leq z_m$ ed a 0.5 per $z_m \leq z \leq z_p$.

Conseguentemente per il *LAI* (Eq. (26)):

$$LAI = \int_0^{z_p} LAD(z) dz = \int_0^{z_p} LAD_m \left(\frac{z_p - z_m}{z_p - z} \right)^n \exp \left[n \left(1 - \frac{z_p - z_m}{z_p - z} \right) \right] dz \quad (26)$$

Discorso simile anche per la *RAD* (“Root Area Density”), cioè la densità delle radici all’interno del terreno. In questo caso infatti si divide la porzione di terreno interessata dalla presenza delle stesse in 10 blocchi di ugual dimensione e per ognuno di essi si riporta il valore di tale parametro.

Con riferimento quindi all'arancio attualmente presente all'interno del Chiostro, i valori della *LAD* e della *RAD* risultano essere i seguenti (Tab. 2.2):

Tabella 2.2. Valori della *LAD* e della *RAD* relativi all'arancio.

LAD 1 [$z/z_p=0.1$]	0.000	RAD 1 [$z/z_r=0.1$]	0.100
LAD 2 [$z/z_p=0.2$]	0.000	RAD 2 [$z/z_r=0.2$]	0.100
LAD 3 [$z/z_p=0.3$]	0.000	RAD 3 [$z/z_r=0.3$]	0.100
LAD 4 [$z/z_p=0.4$]	0.070	RAD 4 [$z/z_r=0.4$]	0.100
LAD 5 [$z/z_p=0.5$]	0.275	RAD 5 [$z/z_r=0.5$]	0.100
LAD 6 [$z/z_p=0.6$]	0.500	RAD 6 [$z/z_r=0.6$]	0.100
LAD 7 [$z/z_p=0.7$]	1.060	RAD 7 [$z/z_r=0.7$]	0.100
LAD 8 [$z/z_p=0.8$]	1.000	RAD 8 [$z/z_r=0.8$]	0.100
LAD 9 [$z/z_p=0.9$]	0.850	RAD 9 [$z/z_r=0.9$]	0.100
LAD 10 [$z/z_p=1.0$]	0.000	RAD 10 [$z/z_r=1.0$]	0.100

Come si può notare, per la *RAD* il valore impostato non risulta variare in funzione della profondità: è stata fatta tale scelta in accordo con i valori riscontrati all'interno del "Plant Database" relativo ad ENVI-met dove, per tutte le tipologie di piante e ad ogni profondità, si ha il valore di 0.100.

2.4.3. Main sections IV: Soils

Per completare la sezione relativa alla geometria del modello, occorre andare a definire le tipologie di terreno presenti nello stesso.

Si ha a tal proposito un pavimento con piastrelle per il portico ed un terreno caratterizzato dalla presenza di calcestruzzo e ciottoli per il cortile.

Per ogni materiale verrà quindi riportato un ID identificativo dello stesso, la sigla *V* che indica il tipo di terreno (0 individua un suolo permeabile, 1 un suolo impermeabile e 2 è rappresentativo di acqua), il contenuto volumetrico di acqua in condizioni di saturazione η_s , il contenuto volumetrico di acqua con riferimento alla capacità del terreno η_{fc} , il contenuto volumetrico di acqua in corrispondenza del punto di appassimento η_{wilt} , la matrice potenziale *MatPot* che tiene conto delle forze adesive intermolecolari tra l'acqua ed il materiale solido con cui la stessa è a contatto, la conduttività idraulica $K_{\mu s}$, la capacità termica volumetrica *CP*, la costante di Clapp ed Hornberger *b* e la conducibilità termica del materiale *HCN*.

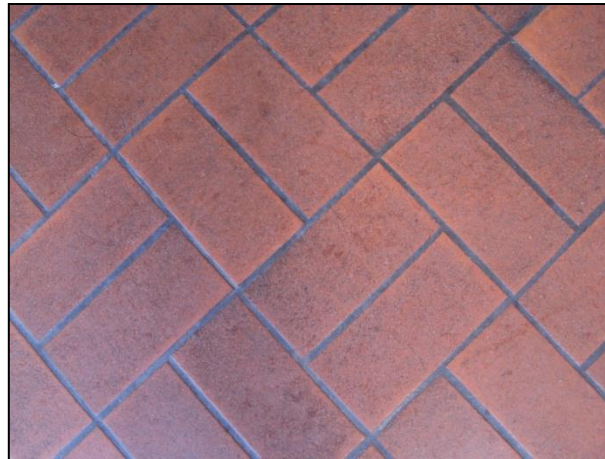
Se ne riportano quindi le caratteristiche, anch'esse opportunamente editate, partendo proprio dal pavimento con piastrelle (Tab. 2.3):

Tabella 2.3. Caratteristiche relative al pavimento con piastrelle.

ID	V	η_s [m ³ m ⁻³]	η_{fc} [m ³ m ⁻³]	η_{wilt} [m ³ m ⁻³]	MatPot [m]	$K_{\mu s}$ [10 ⁻⁶ ms ⁻¹]	CP [10 ⁶]m ⁻³ K ⁻¹]	B [ad]	HCN [Wm ⁻¹ K ⁻¹]
p	1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.909	0.000	1.20

Nella Figura 2.4 che segue viene riportata un'immagine di tale pavimento:

Figura 2.4. Particolare del pavimento con piastrelle.



Questo risulta però essere costitutivo solo dello strato superficiale del suolo al di sotto del portico; per definire quest'ultimo in maniera esaustiva dal punto di vista della composizione è stato poi editato l'intero profilo. Nella Tab. 2.4 riportata i valori numerici posti al di sotto della casella relativa all'ID rappresentano la profondità del baricentro della singola cella rispetto alla superficie e si può notare come la distanza tra l'una e l'altra aumenti all'aumentare della profondità (a testimonianza quindi del fatto che le celle risultano essere più piccole in prossimità della superficie). Analogamente a quanto fatto in precedenza, la definizione dell'intero profilo del suolo influenza quelli che sono i fenomeni evapotraspirativi; occorre però ricordare che qualora si avesse a che fare con un profilo impermeabile detti fenomeni non avrebbero luogo.

Tabella 2.4. Profilo del suolo al di sotto del portico.

ID	p
0.015	p
0.025	zb
0.035	zb
0.045	zb
0.055	zb
0.070	sd
0.090	le
0.150	le
0.250	le
0.350	le
0.450	le
0.750	le
1.250	le
1.750	le
Z_0	0.006
α_s	0.37
ε_s	0.88

Nella tabella riportata con Z_0 si indica la lunghezza di rugosità aerodinamica della superficie, con α_s si indica il coefficiente di albedo relativo ai flussi radiativi ad alta frequenza e con ε_s si definisce l'emissività relativa ai flussi radiativi a bassa frequenza.

Si può notare inoltre come nella stratigrafia riportata compaiano gli ID “zb”, “sd” e “le”. Questi corrispondono rispettivamente a cemento, sabbia e terra e ne vengono riportate le caratteristiche nelle Tabs. 2.5, 2.6, 2.7:

Tabella 2.5. Caratteristiche relative al cemento.

ID	V	η_s [m ³ m ⁻³]	η_{fc} [m ³ m ⁻³]	η_{wilt} [m ³ m ⁻³]	MatPot [m]	$K_{\mu s}$ [10 ⁻⁶ ms ⁻¹]	CP [10 ⁶]m ⁻³ K ⁻¹]	B [ad]	HCN [Wm ⁻¹ K ⁻¹]
zb	1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	2.083	0.000	1.63

Tabella 2.6. Caratteristiche relative alla sabbia.

ID	V	η_s [m ³ m ⁻³]	η_{fc} [m ³ m ⁻³]	η_{wilt} [m ³ m ⁻³]	MatPot [m]	$K_{\mu s}$ [10 ⁻⁶ ms ⁻¹]	CP [10 ⁶]m ⁻³ K ⁻¹]	B [ad]	HCN [Wm ⁻¹ K ⁻¹]
sd	0	0.395	0.135	0.0068	-0.121	176.000	1.463	4.050	0.000

Tabella 2.7. Caratteristiche relative alla terra.

ID	V	η_s [m ³ m ⁻³]	η_{fc} [m ³ m ⁻³]	η_{wilt} [m ³ m ⁻³]	MatPot [m]	$K_{\mu s}$ [10 ⁻⁶ ms ⁻¹]	CP [10 ⁶]m ⁻³ K ⁻¹]	B [ad]	HCN [Wm ⁻¹ K ⁻¹]
le	0	0.451	0.240	0.155	-0.478	7.000	1.212	5.390	0.000

Discorso differente invece per il cortile: nella configurazione attuale del chiostro questo vede infatti la presenza di calcestruzzo e ciottoli (Fig. 2.5).

Figura 2.5. Particolare della superficie in calcestruzzo e ciottoli.



Si procede riportando quindi in Tab. 2.8 le caratteristiche dello strato superficiale, ottenute mediante una media pesata tra quelle del calcestruzzo e quelle dei ciottoli:

Tabella 2.8. Caratteristiche relative allo strato superficiale del cortile.

ID	V	η_s [m ³ m ⁻³]	η_{fc} [m ³ m ⁻³]	η_{wilt} [m ³ m ⁻³]	MatPot [m]	$K_{\mu s}$ [10 ⁻⁶ ms ⁻¹]	CP [10 ⁶]m ⁻³ K ⁻¹]	B [ad]	HCN [Wm ⁻¹ K ⁻¹]
cc	1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	2.234	0.000	1.680

In Tab. 2.9 sono riportate invece le caratteristiche relative all'intero profilo del suolo:

Tabella 2.9. Profilo del suolo nel cortile.

ID	cc
0.015	zb
0.025	zb
0.035	zb
0.045	zb
0.055	sd
0.070	le
0.090	le
0.150	le
0.250	le
0.350	le
0.450	le
0.750	le
1.250	le
1.750	le
Z ₀	0.010
α_s	0.40
ϵ_s	0.90

Gli ID “zb”, “sd” e “le” afferiscono chiaramente alle tabelle sopra riportate.

2.5. Configuration File

Il .CF file definisce il settaggio della simulazione da lanciare, per esempio il nome dell’“Area Input File”, il nome identificativo della simulazione in esame ed i parametri di natura meteorologica.

Ogni simulazione è individuata dal proprio .CF file: posso usare infatti anche lo stesso “Area Input File” in simulazioni differenti ma ognuna di queste necessita del proprio file .CF.

Ogni file di ingresso è un ASCII text-file ed il “Configuration File” si basa su un blocco di informazioni che devono essere incluse per lanciare la simulazione; possono inoltre essere aggiunte ulteriori sezioni per definire in maniera completa tutti i parametri che intervengono nella fenomenologia. Tali sezioni permettono di cambiare i valori di default di ENVI-met e non importa l’ordine in cui queste appaiono nel file .CF: è però necessario che le righe di codice afferenti alla singola sezione seguano un ordine prefissato.

2.5.1. Basic settings

Ogni file .CF inizia con una struttura fissa essenziale per ogni simulazione.

In tale sezione saranno descritti tutti i parametri impostati dedicando uno spazio più ampio a quelli che necessitano di essere approfonditi.

È stato chiaramente necessario impostare il nome identificativo della simulazione effettuata, l’“Area Input File” su cui lavorare e precedentemente costruito, il nome identificativo degli output generati dal software, la cartella in cui esso deve riportarli e l’intervallo temporale di salvataggio dei dati (impostato con cadenza oraria).

2.5.1.1. Start Simulation at Day (DD. MM. YYYY)

La data scelta per mostrare i passi che conducono alla taratura del modello costruito è il 13 febbraio 2014.

È stato infatti necessario effettuare la campagna di misurazione sperimentale nel Chiostro durante una giornata caratterizzata da cielo sereno ed assenza di nubi.

In Fig. 2.6 si può apprezzare la configurazione sinottica relativamente alla suddetta giornata, leggendo in particolare i valori della temperatura ad 850 hPa (circa 1400 metri di quota) e l'altezza geopotenziale. Questa si ottiene dal rapporto tra geopotenziale e forza di gravità media al livello del mare; la sua unità di misura è il gpdam (geopotenziale per decametro).

Si può comunque notare come la giornata in questione vede un campo di alta pressione sulla penisola italiana: esso è dovuto all'anticiclone delle Azzorre.

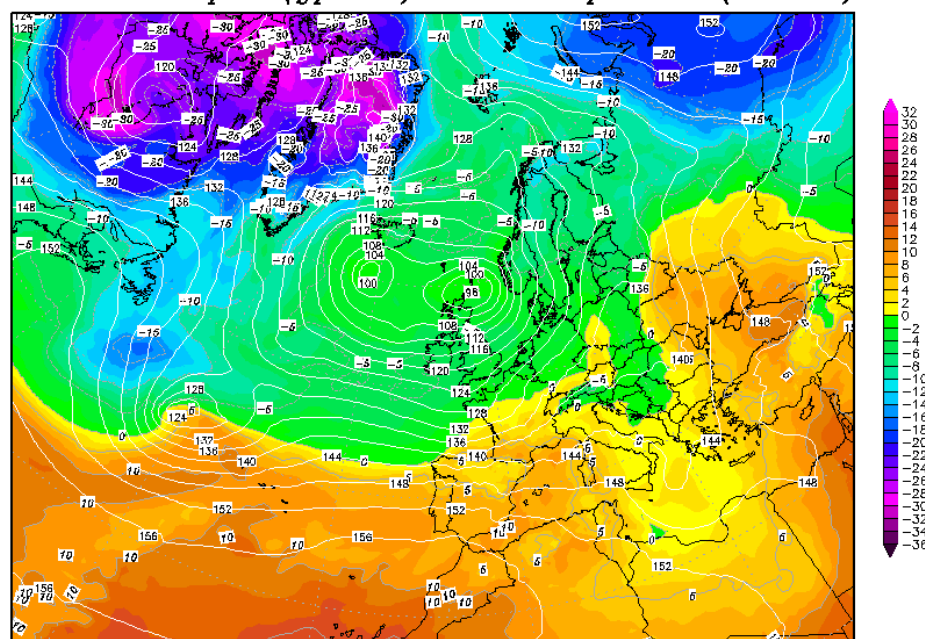
Nella stagione invernale tale anticiclone può sia rimanere in oceano Atlantico, sia posizionarsi in senso meridiano, determinando la formazione dell'anticiclone scandinavo o fondendosi ad alte latitudini con l'anticiclone russo-siberiano che, espandendosi verso sud-ovest, porta venti forti nord-orientali sul Mediterraneo. In questo caso spesso si formano depressioni sul basso Tirreno, che determinano condizioni di tempo molto perturbato su tutta l'Italia meridionale e sul medio-basso versante Adriatico, dove spesso può nevicare anche in pianura e lungo le coste, mentre in questo scenario l'Italia settentrionale, la Toscana, l'alto Lazio e parte della Sardegna si ritrovano riparate dalle Alpi e dagli Appennini e sono interessate da giornate ventose con cielo sereno e terso. Altre volte, invece, l'alta pressione delle Azzorre riesce ad espandersi per alcuni giorni verso l'Europa e verso il Mediterraneo, garantendo condizioni di stabilità ed assenza di vento, con formazione di nebbie nelle pianure e nelle valli interne.

E' proprio nell'ambito di una situazione come l'ultima descritta che trova luogo la giornata presa in esame per la taratura; da precisare comunque la totale assenza di nebbia.

Figura 2.6. Temperatura ad 850 hPa ed altezze geopotenziali relative al giorno 13 febbraio 2014.

13FEB2014 06Z

850 hPa Geopot. (gpdam) und Temperatur (Grad C)



Daten: CFS Reanalysis
(C) Wetterzentrale
www.wetterzentrale.de

Si deve inoltre tenere conto del fatto che, per avere dei valori delle variabili in uscita da ENVI-met depurati da problematiche connesse all'inizializzazione, la simulazione durerà 72 ore. Conseguentemente il giorno d'inizio della stessa risulterà essere l'11 febbraio.

Così facendo i primi due giorni di simulazione saranno scartati e verranno presi i dati relativi al terzo, cioè a quello desiderato.

2.5.1.2. Start Simulation at Time (HH. MM. SS) / Total Simulation Time in Hours

In tale paragrafo si discutono invece le scelte relative all'ora in cui far partire la simulazione ed al tempo totale della stessa (in parte discusso al paragrafo precedente).

Si ricordi a tal proposito che un modello numerico necessita di un tempo di inizializzazione: pertanto il momento migliore per iniziare la simulazione è la notte o l'alba in modo da consentire al software di seguire i processi atmosferici. Per tale ragione si è scelto di far partire la simulazione alle 06:00:00 del mattino e di far durare la stessa 72 ore in modo tale da riprodurre correttamente la fenomenologia relativamente al giorno desiderato.

2.5.1.3. Wind Speed in 10 m above Ground [m/s]

In tale sezione si è posta la velocità del vento V_{Az} all'altezza di 10 m sul livello del suolo pari a 3.05 m/s.

I dati sul vento locale, a tal proposito, sono essenziali per la valutazione dell'ambiente ventilato in spazi aperti. I parametri più importanti sono appunto la velocità media e la direzione del vento durante il periodo in cui lo spazio viene occupato.

Solitamente tali dati vengono misurati a 10 m d'altezza rispetto alla superficie della terra, in stazioni meteorologiche situate in aree non urbanizzate.

Da questi possono poi essere ricavati i valori della velocità del vento in area urbana e ad altezze differenti.

Indicando infatti con S il rapporto tra la velocità V_{Az} che il vento assume ad un'altezza pari a z in area urbana e quella V_{A10} che lo stesso assume in una zona non urbanizzata a 10 m dal suolo, si può riportare la seguente Tab. 2.10 :

Tabella 2.10. Valori del rapporto S per varie altezze z in area urbana e suburbana.

z [m]	S (area suburbana)	S (area urbana)
10	0.60	0.36
20	0.73	0.47
30	0.82	0.55
40	0.89	0.62
50	0.94	0.68
60	0.99	0.73
70	1.04	0.77
80	1.08	0.82
90	1.11	0.86
100	1.14	0.89
110	1.18	0.93
120	1.21	0.96
130	1.24	0.99
140	1.27	1.02
150	1.29	1.05

Da questa si può asserire ad esempio che la velocità del vento a 100 m di altezza in un'area urbana corrisponde all'89% della velocità del vento a 10 m di altezza in una zona non urbanizzata.

Il valore di V_{A10} rilevato risulta essere infine pari a 8.47 m/s. Esso fa riferimento alla stazione di Pratica di Mare, collocata a Sud-Ovest rispetto alla città di Roma e quindi rappresentativa delle caratteristiche della massa d'aria proveniente da quella direzione.

Tale valore è stato registrato con una certa continuità in termini di modulo e di verso della direzione durante la giornata considerata e pertanto lo si può considerare esente dall'eventuale influenza di brezze di mare o di terra.

2.5.1.4. Roughness Length z_0 at Reference Point

La lunghezza di rugosità aerodinamica z_0 è un parametro complementare alla velocità del vento.

Definisce la rugosità della superficie della località in cui è misurata la velocità del vento V_{Az} all'altezza di 10 m dal suolo. Questi due valori sono usati per calcolare la velocità del vento geostrofico, un vento teorico risultante dal perfetto equilibrio tra la forza di Coriolis e la forza dovuta al gradiente di pressione.

Tornando al discorso relativo alla lunghezza di rugosità aerodinamica, valori tipici per la stessa sono riportati in Tab. 2.11.

In questa i valori di tale parametro sono correlati alla tipologia di copertura del terreno.

Essi variano da valori compresi tra 0.5 m e 2.0 m per le aree urbane fino a valori di circa 0.1 mm per il mare calmo.

Tabella 2.11. Valori tipici della lunghezza di rugosità aerodinamica.

Copertura del terreno	Valori tipici di z_0
Aree urbane	0.5 – 2.0 m
Aree suburbane	0.3 – 0.5 m
Foreste	0.5 – 1 m
Terreni agricoli	2 – 10 cm
Terreni erbosi	0.5 – 5 cm
Mare mosso	1 mm
Mare calmo	0.1 mm

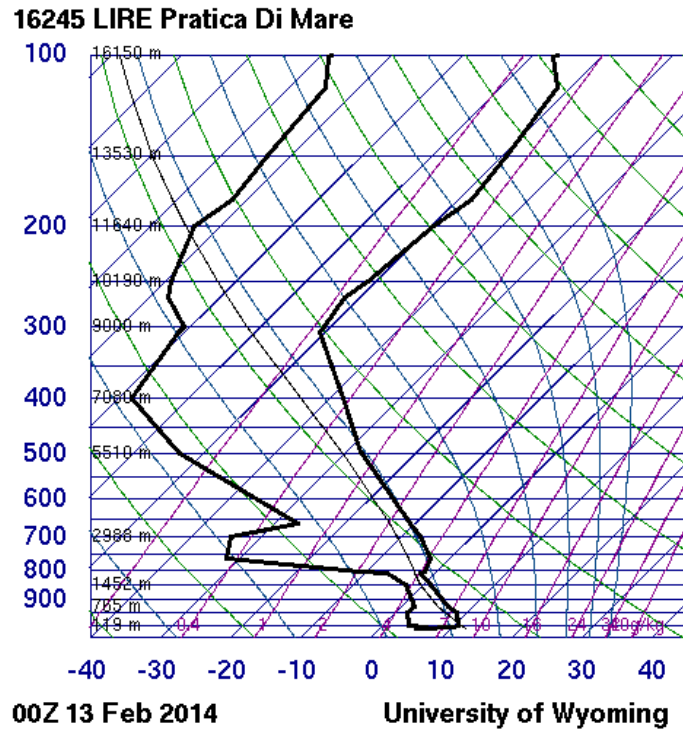
La zona in cui sorge il sito studiato è chiaramente un'area urbana e pertanto il valore di z_0 risulterà essere pari ad 1.0 m. La scelta di tale valore è anche una conseguenza del fatto che ENVI-met consente di impostare un valore per la lunghezza di rugosità aerodinamica al massimo pari a metà della dimensione lungo l'asse z della cella a contatto con il terreno.

2.5.1.5. Initial Temperature Atmosphere/Wind direction/Specific Humidity in 2500 m

La temperatura iniziale dell'atmosfera all'altezza di 2500 m è ricavata dal radiosondaggio relativo alla giornata esaminata ed effettuato su Pratica di Mare.

Con riferimento al 13 febbraio 2014 si riporta quindi la Fig. 2.7 seguente:

Figura 2.7. Radiosondaggio effettuato alle 00Z del 13 febbraio 2014 su Pratica di Mare.



Da questa si può osservare come la temperatura a 2500 m risulti essere pari a 269 K in termini di temperatura assoluta e quindi a 292.40 K in termini di temperatura potenziale, ricavata mediante la carta pseudo-adiabatica.

I radiosondaggi sono disponibili per le ore 00Z e per le 12Z di qualunque giorno: si farà tuttavia riferimento al primo orario in quanto, partendo la simulazione alle 06:00:00 del mattino, i valori da esso ricavati risultano essere vicini a quelli desiderati. Inoltre tale scelta è basata anche sul fatto che le mappe sinottiche considerate si riferiscono alle 00Z.

Relativamente alla direzione del vento invece si è impostato il valore di 175°.

La provenienza del vento, nei radiosondaggi e in ENVI-met, viene espressa in gradi sessagesimali, per cui a 0° (o 360°) corrisponde il Nord, a 90° l'Est, a 180° il Sud, a 270° l'Ovest; con 45° abbiamo Nord-Est, 135° Sud-Est, 225° Sud-Ovest, 315° Nord-Ovest.

Si passa quindi a studiare l'umidità specifica all'altezza di 2500 m.

Anch'essa può essere ricavata dai radiosondaggi. Si considera infatti l'isoigrometrica che interseca la curva della temperatura di rugiada all'altezza di 2500 m ed avremo quindi un valore di circa 0.36Kg_v/Kg_{AS}⁻¹.

2.5.1.6. Relative Humidity in 2 m

Tra i dati che è necessario inserire in ingresso al software compare anche l'umidità relativa a 2 m sul livello del suolo. Si tratta di un valore dato in termini percentuali e serve per calcolare il gradiente verticale relativo all'umidità.

Esso è stato ricavato da archivi climatici e serve per la fase di inizializzazione.

Per la giornata del 13 febbraio 2014 è stato quindi impostato pari a 60%.

2.5.2. Optional sections

In questa sezione si discutono quelle che sono le impostazioni opzionali del “Configuration File”.

Sebbene il loro inserimento in quest’ultimo non è necessario per svolgere la simulazione, nel nostro caso sono state aggiunte in alcuni casi per motivi di ovvia necessità (Voto Medio Previsto, informazioni relative agli edifici) mentre in altri per procedere alla raffinazione della simulazione.

2.5.2.1. Buildings

In questa sezione si devono impostare vari parametri connessi agli edifici presenti nel modello. Questi sono:

- temperatura interna degli edifici $T_{a,i}$ [K];
- trasmittanza termica delle pareti K_w [W/m²K];
- trasmittanza termica del tetto K_r [W/m²K];
- coefficiente di albedo delle pareti α_w [ad];
- coefficiente di albedo del tetto α_r [ad].

Tali parametri sono impostati per tutti gli edifici e non è possibile definire proprietà termiche o colori per una singola struttura.

La temperatura interna $T_{a,i}$ è stata posta, per la simulazione di taratura, pari a 293 K in accordo con quanto prescritto nel Decreto del Presidente della Repubblica n. 551 del 21 dicembre 1999.

Per determinare le trasmittanze termiche si è adoperata invece la relazione che segue (Eq. (27)):

$$K = \frac{1}{1/\alpha_1 + \sum_{i=1}^n s_i/\lambda_i + 1/\alpha_2} \quad (27)$$

dove:

- α_1 ed α_2 sono i coefficienti di adduzione interna ed esterna [W/m²K];
- s_i è lo spessore dell’i-esimo strato di materiale [m];
- λ_i è la conducibilità termica interna del materiale [W/mK].

Le pareti che si affacciano sul Chiostro sono muri portanti dello spessore di 0.45 m e vedono la presenza di un intonaco in calce e gesso internamente e di malta di calce esternamente. Nel mezzo si hanno mattoni pieni. Tenuto quindi conto che $\alpha_1 = 8.12$ W/m²K e che $\alpha_2 = 23.2$ W/m²K, si ha che $K_w = 1.25$ W/m²K.

Per quanto riguarda la trasmittanza termica K_r del tetto si ricava, mediante la formula sopra riportata, il valore $K_r = 1.54$ W/m²K; si fa presente che in questo caso si tratta di un flusso ascendente e pertanto $\alpha_1 = 9.28$ W/m²K ed $\alpha_2 = 23.2$ W/m²K.

Si riportano infine i valori adoperati per il coefficiente di albedo delle pareti $\alpha_w = 0.27$ e per quello relativo al tetto $\alpha_r = 0.13$.

2.5.2.2. Clouds

In questa sezione è stata impostata la totale assenza di nubi per il giorno considerato.

Ciò è dovuto al fatto che, in condizioni di cielo sereno, è possibile apprezzare nella maniera migliore possibile le differenze spaziali e temporali. Inoltre la radiazione diffusa non viene attenuata dalla vegetazione ed in caso di presenza significativa della stessa si potrebbero avere temperature più alte con cielo coperto che con cielo sereno.

Conseguentemente la copertura nuvolosa del cielo viene impostata pari a 0/8 a quota bassa, media ed alta.

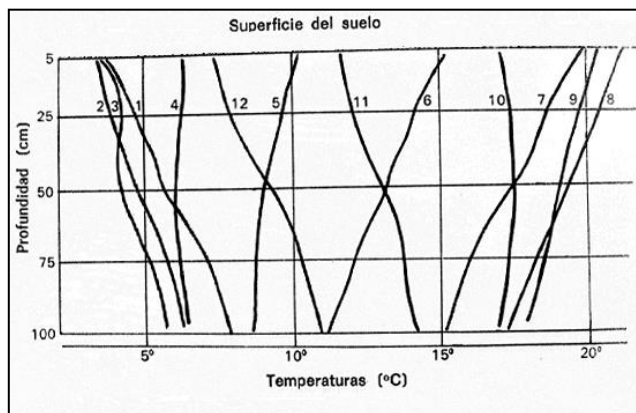
2.5.2.3. Soil Data

In questa sezione si deve riportare la temperatura e l'umidità relativa iniziale del terreno, considerato diviso in 3 strati: il primo, quello superficiale, comprende i primi 20 cm al di sotto della superficie; il secondo è rappresentativo della porzione di terreno compresa tra i 20 ed i 50 cm al di sotto dello strato superficiale ed infine il terzo contempla la parte di suolo al di sotto dei 50 cm.

Nell'impostare i valori atti a procedere all'inizializzazione delle variabili considerate, occorre tenere conto del fatto che la temperatura del terreno a 2 m di profondità viene mantenuta costante durante la simulazione e che il valore dell'umidità relativa non deve essere inferiore al 10%. Quest'ultimo viene poi automaticamente posto pari a 0 per terreni impermeabili.

Nel caso in questione le temperature del terreno sono state dedotte dalla Fig. 2.8. Essa riporta il profilo termico del suolo in funzione dei vari mesi dell'anno per località caratterizzate da un tipo di clima mediterraneo.

Figura 2.8. Profili termici mensili del suolo per località mediterranee.



Per quanto concerne invece l'umidità relativa sono stati mantenuti i valori di default del software, essendo gli stessi quelli consigliati e tenendo conto del successivo processo di raffinamento dei valori afferenti a tale variabile.

Si riporta di conseguenza la Tab. 2.12 nella quale si riassumono i valori delle variabili impostate per il giorno 13 febbraio 2014:

Tabella 2.12. Configurazione iniziale del suolo per il caso invernale.

Temperatura iniziale dello strato 0-20 cm	276 K
Temperatura iniziale dello strato 20-50 cm	277 K
Temperatura iniziale dello strato al di sotto dei 50 cm	280 K
Umidità relativa dello strato 0-20 cm	50%
Umidità relativa dello strato 20-50 cm	60%
Umidità relativa dello strato al di sotto dei 50 cm	60%

2.5.2.4. Solar Adjust

Tale caratteristica permette di regolare la radiazione a corta lunghezza d'onda calcolata dal software per la situazione in esame.

Per alcune località infatti ENVI-met potrebbe annoverare tra i risultati dei suoi calcoli un valore della radiazione troppo alto oppure troppo basso. Si può pertanto intervenire impostando un fattore moltiplicativo del valore dei flussi radiativi ad alta frequenza ottenuti: questo risulta compreso tra 0.5 ed 1.5. Per il caso studiato tuttavia si imposterà il valore di tale fattore pari ad 1 abilitando allo stesso tempo la funzione "Preview Radiation Function".

2.5.2.5. Timing

ENVI-met offre la possibilità di cambiare l'intervallo di aggiornamento di quei processi che non sono valutati ad ogni time-step. Non devono comunque essere impostati intervalli temporali troppo ampi.

Di conseguenza si adopereranno i valori di default di ENVI-met.

La temperatura e l'umidità delle varie superfici verranno aggiornate ogni 30 s, i dati relativi al vento ed alla turbolenza ogni 900s, la posizione del Sole, i flussi radiativi ad esso connessi e le ombre ogni 600 s ed infine i dati relativi alle piante (temperature delle foglie, resistenza legata agli stomi...) anch'essi ogni 600 s.

2.5.2.6. Time Steps

Nella presente sezione vengono invece assegnati i valori temporali da associare al time step in ciascuna delle categorie in cui viene divisa la giornata.

A tal proposito queste sono 3 e sono definite in base all'altezza del Sole. ENVI-met, in funzione di questa, permette di regolare dinamicamente il timestep adottandone uno più piccolo in corrispondenza di quei momenti in cui l'altezza del Sole è elevata; viceversa esso può essere più ampio in corrispondenza delle ore notturne ed al mattino.

Per le simulazioni afferenti allo studio del benessere termoigrometrico nel Chiostro si adopererà per le 3 categorie temporali un time step di 2 s, coincidente con quello più piccolo tra i time steps di default.

2.5.2.7. Turbulence

ENVI-met consente in questo caso di scegliere tra il "Prognostic 1.5 Order E-Epsilon Closure Model" ed il "Diagnostic 1st Order Mixing Length Model".

I problemi con il primo modello derivanti dalle versioni precedenti del software sembrano risolti e per tale ragione sarà esso ad essere usato. Inoltre risulta essere fortemente raccomandato.

Anche per il “Turbulence Closure 3D Model” viene adoperato l’“1.5 Order E-Epsilon Closure Model”, che calcola in maniera continuativa temperatura ed umidità nel “main loop” del modello.

Per quanto riguarda poi l’“Upper Boundary for E-Epsilon” si è scelto di adoperare l’impostazione “Open (zero gradient)”, come da default, dal momento che si raccomanda caldamente di non apportare variazioni alle impostazioni in questa sezione.

2.5.2.8. LBC-types

Le “Lateral Boundary Conditions” definiscono il modo in cui ENVI-met gestisce i confini del modello.

Le informazioni relative a questi ultimi non possono essere ottenute mediante le equazioni afferenti al suddetto “Prognostic Model” e pertanto devono essere ottenute attraverso metodi più semplici:

- Open Boundary Conditions: alle celle sul bordo vengono assegnati gli stessi valori dei parametri delle celle adiacenti interne all’area di simulazione;
- Closed (o Forced) Boundary Conditions: ai punti sul bordo vengono associati i valori dei parametri calcolati per il modello mono-dimensionale;
- Cyclic Boundary Conditions: ai punti sul bordo vengono associati i valori dei parametri calcolati imponendo all’esterno dei bordi gli stessi valori interni.

Si può scegliere il modello relativamente a temperatura, umidità e variabili legate alla turbolenza.

Nell’ambito del presente studio, essendo i confini del modello distanti dalla struttura oggetto di interesse, sarà impostata la tipologia “Open” per le tre variabili riportate sopra.

Per il campo di moto associato al flusso si usa invece la tipologia “Open” in ogni caso.

2.5.2.9. Nesting Area

Come detto in precedenza, ENVI-met permette di creare, attorno alla zona centrale del modello, una “Nesting Area”, cioè una sorta di zona cuscinetto.

Ciò permette di allontanare i limiti del modello dall’area di interesse e di minimizzare gli indesiderati effetti di bordo.

Bisogna però tenere presente alcuni fattori: qualora all’interno della “Nesting Area” non venisse collocato alcun elemento, la radiazione solare potrebbe raggiungere la superficie indisturbata e ciò si tradurrebbe in una elevata e poco realistica temperatura della superficie di base della “Nesting Area”, soprattutto in presenza di materiali che non danno luogo a fenomeni evaporativi.

Per ovviare a ciò in ENVI-met è possibile adoperare una radiazione solare opportunamente mediata. Se per esempio il 50% della superficie nel modello principale è all’ombra di edifici oppure alberi, le grandezze afferenti alla radiazione solare nella “Nesting Grid” risulteranno essere pari al 50% di quelle possibili.

Questa procedura assicura che le condizioni che troviamo all’interno del dominio principale risultano essere le stesse che vengono riscontrate nella “Nesting Area”. Senza questa modifica il modello si comporta come se al di fuori del dominio principale vi fosse terreno privo d’ombra, cosa che può comunque accadere.

Vista però la configurazione del Chiostro, che vede strutture alte 17 m ed alberi, tale funzione viene abilitata.

Si sceglie infine di non annoverare tra i risultati quelli relativi alla “Nesting Area”.

2.5.2.10. PMV

Volendo studiare il benessere termoigrometrico, si abilita anche la funzione relativa al PMV.

A tal proposito il singolo individuo viene supposto essere in piedi e fermo, come se fosse nella situazione di riposarsi o parlare con eventuali altre persone (tale scelta è stata fatta in accordo con quanto emerso dai risultati dei questionari).

Di conseguenza la sua velocità viene supposta essere pari a 0.0 m/s, il rapporto M/A_{DU} risulta essere pari a 70 W/m² ed η a 0.0.

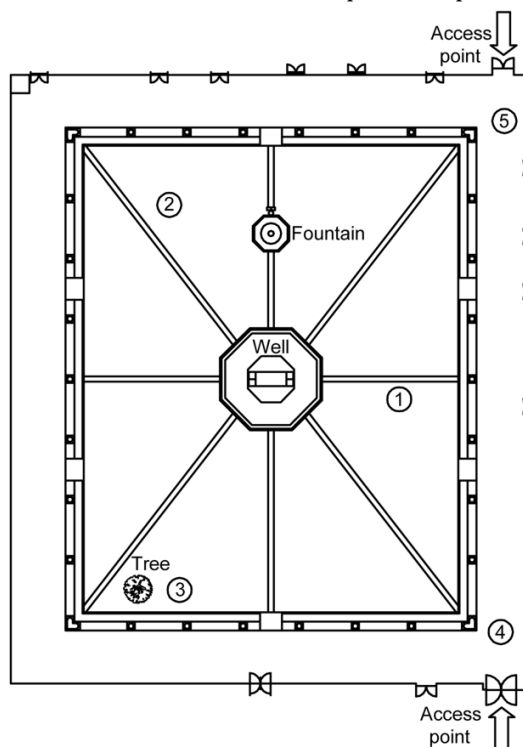
Per quanto concerne il vestiario si suppone un indice di abbigliamento pari a 0.95 clo per la giornata invernale e 0.4 clo per quella estiva.

2.6 Confronto tra i dati sperimentali ed i risultati delle simulazioni

2.6.1. Microclima

La descrizione della metodologia per la taratura di ENVI-met vede il confronto tra i valori sperimentali misurati sul campo e quelli derivanti dalle simulazioni effettuate relativamente ai giorni 6 febbraio 2014, 13 febbraio 2014, 21 maggio 2014, 7 agosto 2014 e 3 ottobre 2014. Tutto questo ha permesso di valutare l'accuratezza del modello e la bontà dei dati forniti in input al software per simulare il microclima del caso studio. Si riporta quindi una planimetria del sito studiato con i punti di misurazione scelti (Fig. 2.9).

Figura 2.9. Planimetria del chiostro e corrispondenti punti di misura.



Prima del confronto dei dati sperimentali con gli output del modello, è stata però valutata l'accuratezza degli output di ENVI-met al variare della griglia di calcolo impostata nel software e per capire quanto una griglia di calcolo più o meno fitta influenzasse la precisione dei risultati. Una griglia di calcolo più fitta può comportare meno errori di natura numerica nel risolvere le equazioni del software, ma comporta tempi di calcolo più lunghi e maggiori necessità di risorse hardware.

Per la giornata 13 febbraio 2014 sono state eseguite delle simulazioni preliminari dove, a parità di altri parametri, è stata variata la distanza tra le celle del piano x-y per valutare la mesh sensitivity. Si sono eseguite 3 simulazioni con diverse mesh, rispettivamente contraddistinte da una spaziatura di 1 m, 2 m e 3 m. In particolare per la mesh sensitivity sono state confrontate per i tre casi rispettivamente la temperatura ambiente (Fig. 2.10), la temperatura media radiante (Fig. 2.11), l'umidità relativa (Fig. 2.13) e l'irradiazione globale (Fig. 2.12).

Figura 2.10. Andamento della temperatura dell'aria ricavato da ENVI-met VS valori sperimentali misurati al variare della cell size (per il punto 1 di Figura 2.9 il 13 febbraio 2014).

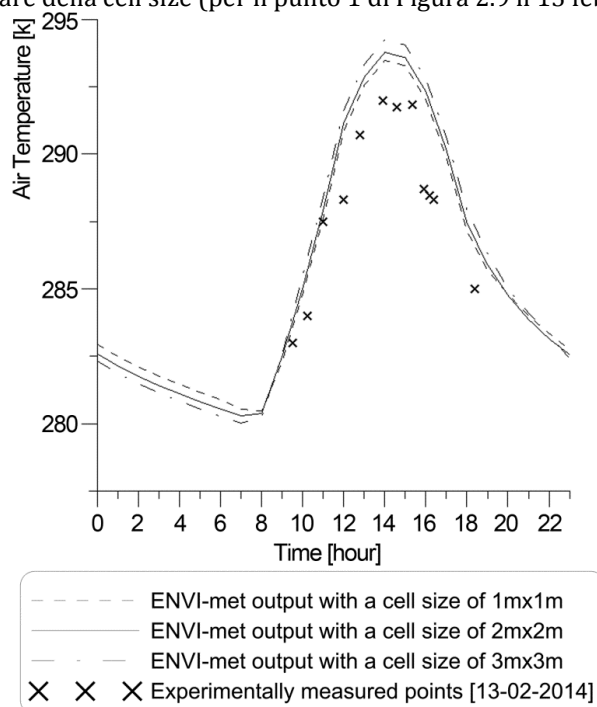


Figura 2.11. Andamento della temperatura media radiante ricavato da ENVI-met VS valori sperimentalmente misurati al variare della cell size (per il punto 1 di Figura 2.9 il 13 febbraio 2014).

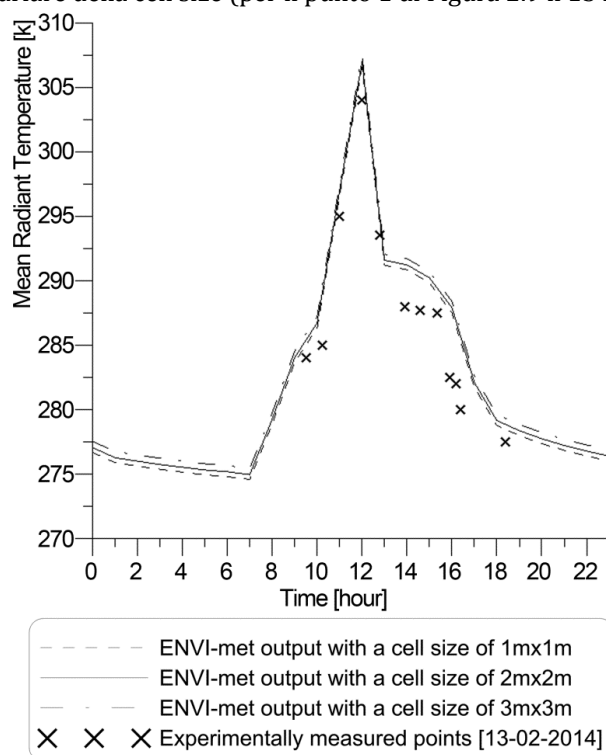


Figura 2.12. Andamento dell'irradiazione globale ricavato da ENVI-met VS valori sperimentalmente misurati al variare della cell size (per il punto 1 di Figura 2.9 il 13 febbraio 2014).

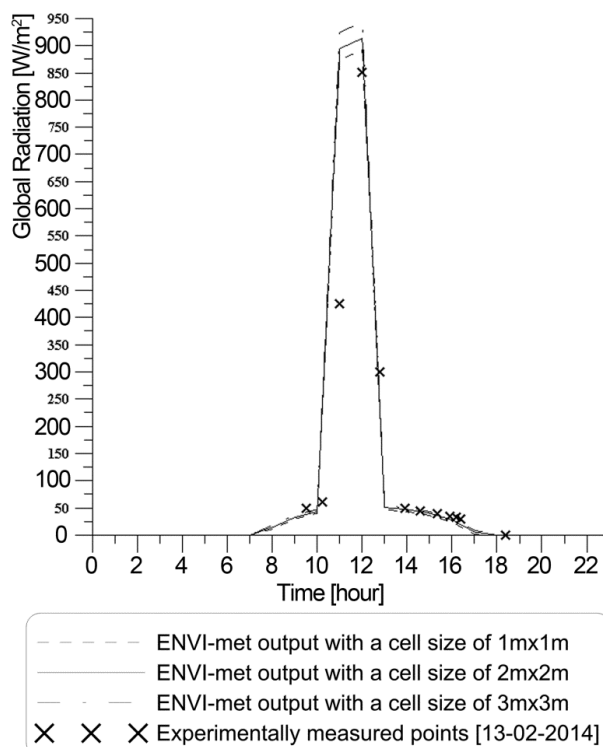
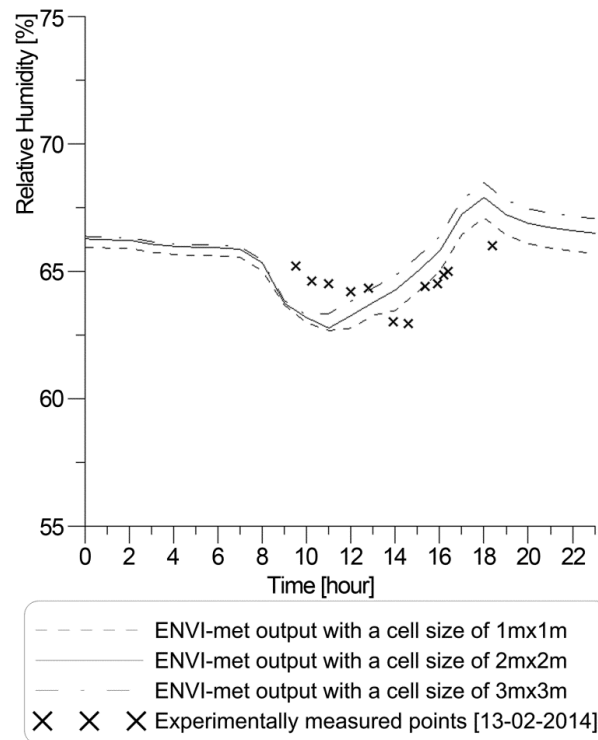


Figura 2.13. Andamento dell'umidità relativa ricavato da ENVI-met VS valori sperimentalmente misurati al variare della cell size (per il punto 1 di Figura 2.9 il 13 febbraio 2014).



Esaminando poi i dati riportati in Tab. 2.13, si può notare che la mesh più fitta ($1 \times 1 \text{ m}^2$) fornisce valori che meglio approssimano le grandezze in uscita ma comporta a parità di hardware un tempo di calcolo tale che non giustifica il suo utilizzo. La mesh meno fitta ($3 \times 3 \text{ m}^2$) comporta tempi di calcolo più rapidi, ma introduce approssimazioni sul calcolo rispetto alla mesh ($2 \times 2 \text{ m}^2$). Si è ritenuto per questa ragione opportuno proseguire i calcoli con questa spaziatura per le celle.

Tabella 2.13. Mesh sensitivity. Variazione media percentuale tra i valori simulati e quelli sperimentalmente misurati di temperatura dell'aria, temperatura media radiante, irradiazione globale ed umidità relativa.

	T_A	T_{MR}	UR	I_G
Cell size of $3 \times 3 \text{ m}^2$	0.81%	1.33%	2.79%	11.25%
Cell size of $2 \times 2 \text{ m}^2$	0.58%	0.85%	2.01%	9.33%
Cell size of $1 \times 1 \text{ m}^2$	0.47%	0.69%	1.76%	8.89%

Le Figs. 2.14-2.17 che seguono mostrano invece il confronto tra i dati sperimentalmente misurati e quelli simulati anche per le altre giornate investigate. Tutti i giorni analizzati sono accumulati da condizioni meteo prive di nuvolosità. Questo perché fenomeni passeggeri quali il transito di sistemi nuvolosi sono completamente aleatori e avrebbero influenzato alcune delle misure rilevate, risultando non comparabili con le simulazioni effettuate con cielo sereno. Per praticità si riportano gli andamenti solo per il Punto 1 di Fig. 2.9, essendo gli scostamenti del medesimo ordine di grandezza per tutti gli altri punti di misura.

Figura 2.14. Andamento della temperatura dell'aria ricavato da ENVI-met VS valori sperimentalmente misurati (per il Punto 1 in Fig. 9 al variare del giorno di campionamento).

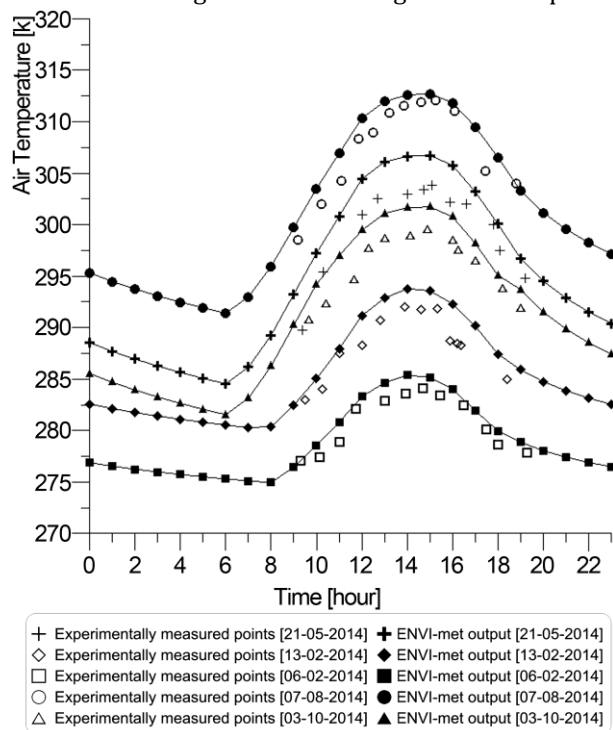


Figura 2.15. Andamento della temperatura media radiante ricavato da ENVI-met VS valori sperimentalmente misurati (per il Punto 1 in Figura 2.9 al variare del giorno di campionamento).

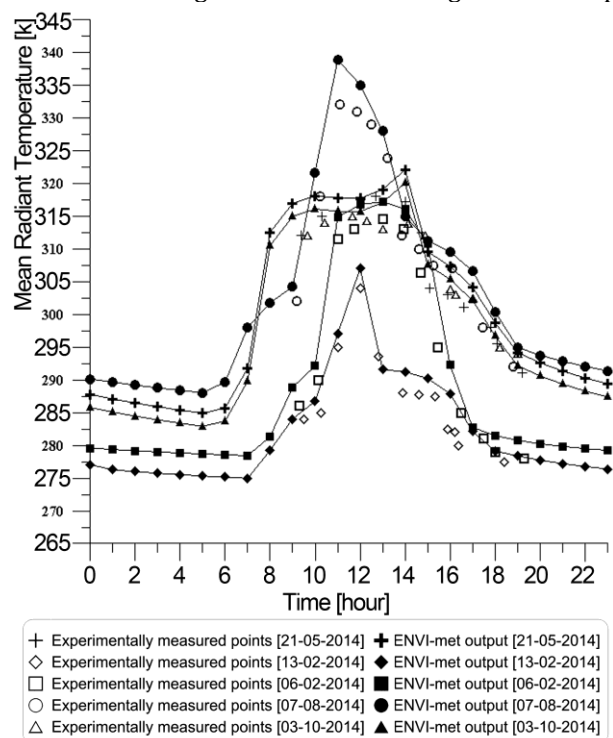


Figura 2.16. Andamento dell'irradiazione globale ricavato da ENVI-met VS valori sperimentalmente misurati (per il Punto 1 in Figura 2.9 al variare del giorno di campionamento).

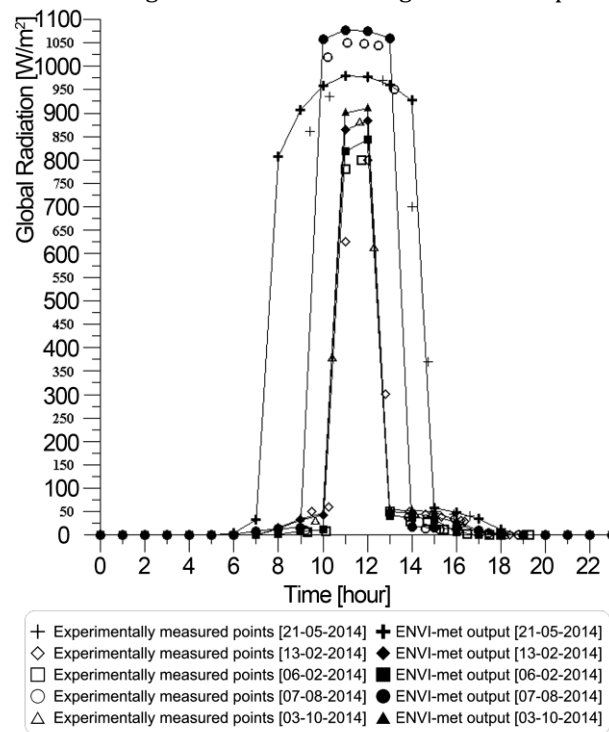
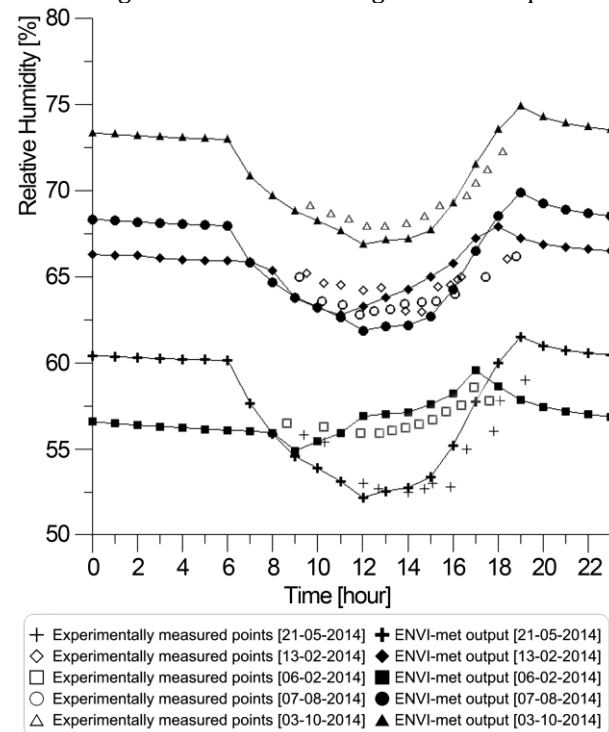


Figura 2.17. Andamento dell'umidità relativa ricavato da ENVI-met VS valori sperimentalmente misurati (per il Punto 1 in Figura 2.9 al variare del giorno di campionamento).



Per procedere ad una valutazione più completa di quelle che sono le prestazioni di ENVI-met, le Figs. 2.18-2.19 riportano il confronto tra i valori sperimentalmente misurati e quelli forniti in uscita dal software per altri due punti di misura all'interno del chiostro. Con riferimento ancora al 13 febbraio 2014, è quindi possibile apprezzare come il software riesca a simulare compiutamente, sia nel tempo che nello spazio, l'andamento di variabili quali la temperatura dell'aria e la temperatura media radiante. Presenta invece una peggiore approssimazione la simulazione dell'umidità relativa: va tuttavia detto che gli essere umani hanno una minor sensibilità nei confronti di variazioni della suddetta variabile.

L'accuratezza delle prestazioni di ENVI-met è stata poi esaminata sulla base di una serie di parametri solitamente adoperati a tale scopo. Essi sono il coefficiente di determinazione (R^2), il Root Mean Square Error (RMSE) ed il Willmott's index of agreement (d). Un modello sarà considerato tanto più affidabile quanto più tali parametri tendono ai seguenti valori: $R^2 \rightarrow 1$, $RMSE \rightarrow 0$ e $d \rightarrow 1$.

Con riferimento al presente studio, essi sono analizzati per le due variabili che maggiormente influenzano la percezione termica nell'area mediterranea: la temperatura dell'aria e quella media radiante. La Tab. 2.14 riporta quindi i valori di R^2 , RMSE e d calcolati prendendo in esame i cinque punti all'interno del sito studiato.

Tabella 2.14. Valutazione quantitativa delle prestazioni di ENVI-met sulla base del coefficiente di determinazione (R^2), del Root Mean Square Error (RMSE) e del Willmott's index of agreement (d).

	R^2 [-]	RMSE [K]	d [-]
T_A	0.88	1.89	0.91
T_{MR}	0.96	2.79	0.87

In particolare, è possibile notare come è stato ottenuto un valore del coefficiente di determinazione di 0.88 e 0.96 rispettivamente per la temperatura dell'aria e per la temperatura media radiante, denotando una forte correlazione tra i valori sperimentali e quelli simulati. Ciò è testimoniato anche dai valori ottenuti per gli altri due parametri: il RMSE varia infatti tra 1.89 K (T_A) e 2.79 K (T_{MR}) mentre d tra 0.87 (T_{MR}) e 0.91 (T_A).

Figura 2.18. Valori delle 4 variabili micrometeorologiche ricavati da ENVI-met VS valori sperimentalmente misurati (per il punto 2 di Figura 2.9 il 13 febbraio 2014).

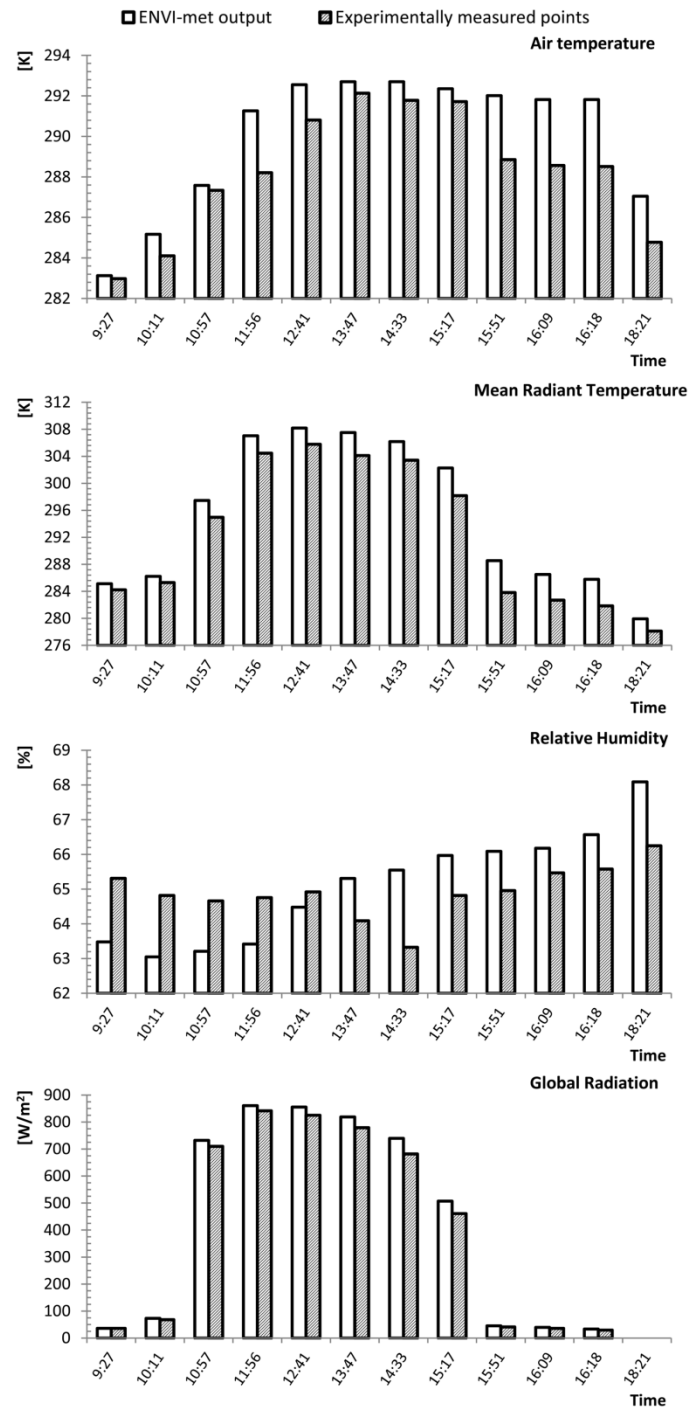
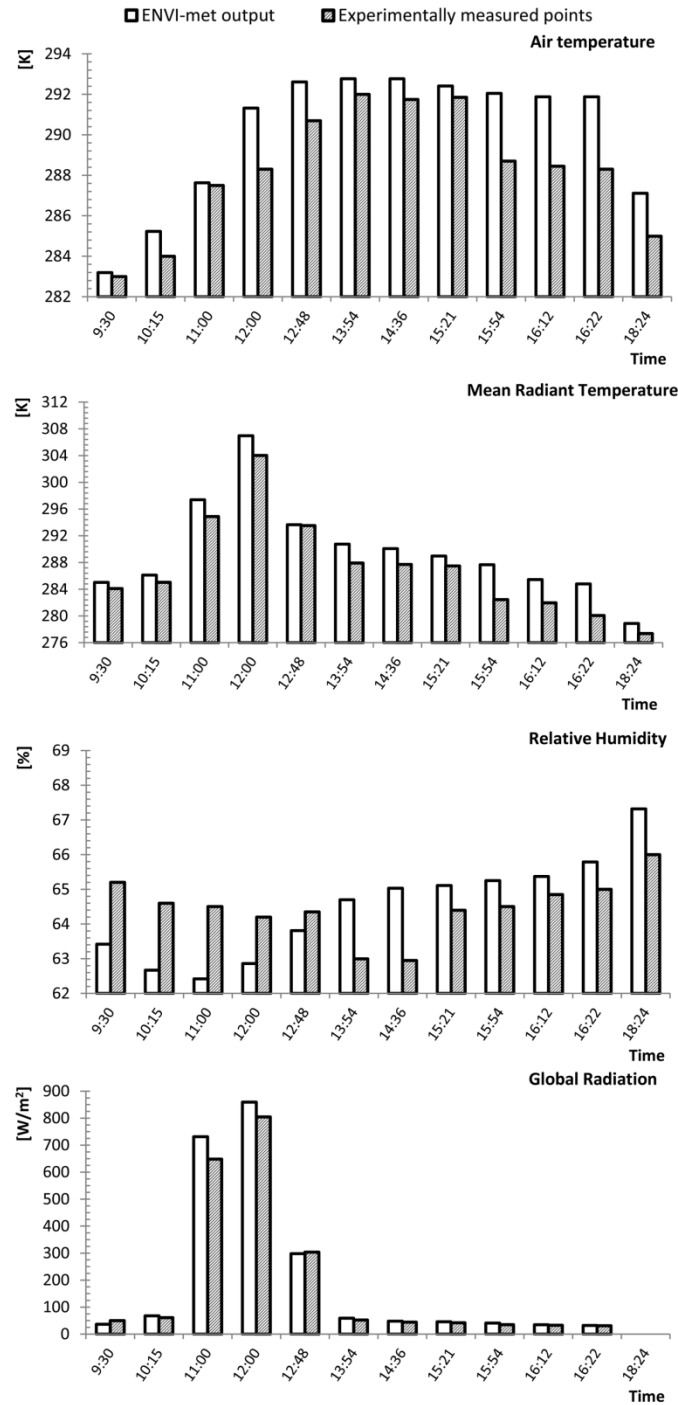


Figura 2.19. Valori delle 4 variabili micrometeorologiche ricavati da ENVI-met VS valori sperimentalmente misurati (per il punto 3 di Figura 2.9 il 13 febbraio 2014).

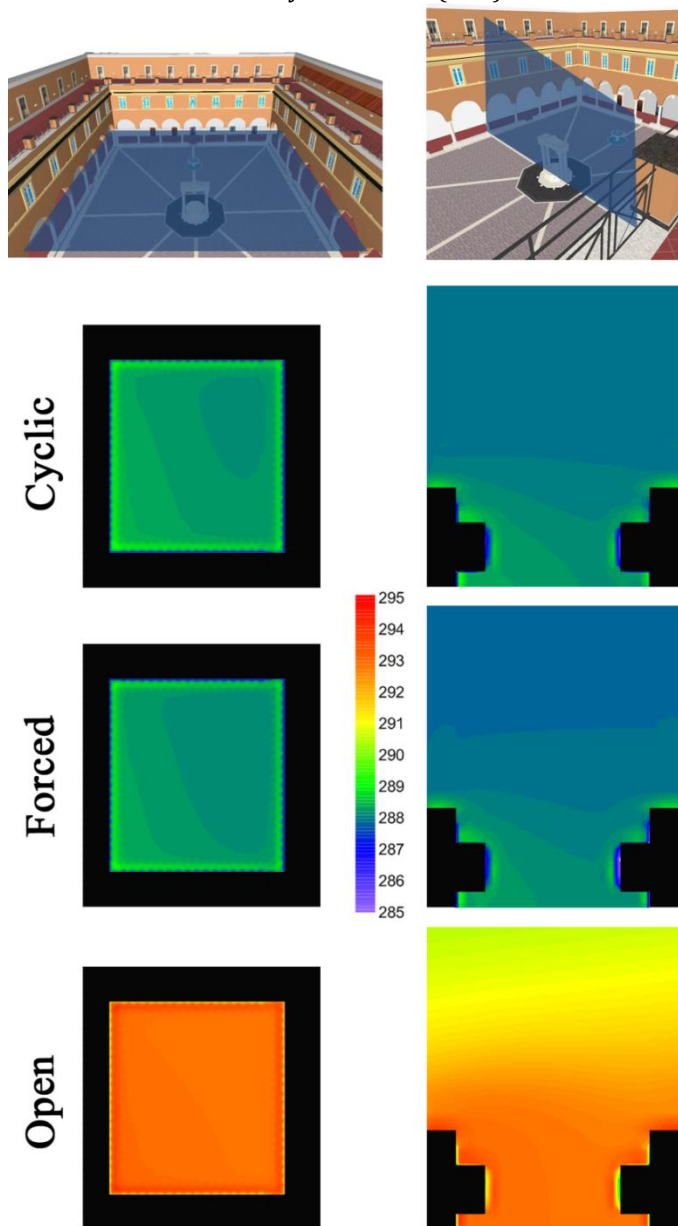


2.6.2. L'influenza delle Lateral Boundary Conditions (LBC)

Le boundary conditions giocano un ruolo estremamente importante nell'acquisizione di dati realistici. Per questa ragione un ulteriore aspetto investigato nello studio ha riguardato l'influenza

delle Lateral Boundary Conditions (LCB) sui risultati forniti dal software. Come esempio, è stata grafica in Fig. 2.20 la temperatura dell'aria con riferimento a due differenti piani di sezione.

Figura 2.20. Temperatura dell'aria su due differenti piani di sezione con cyclic, forced and open Lateral Boundary Conditions (LCB).



È necessario premettere che non è possibile dire in anticipo quale tipologia di LBC è la migliore per un dato caso. Ognuna rappresenta un certo tipo di approccio e deve essere in ogni situazione valutata qual è la migliore assunzione. Come è possibile vedere dalla Fig. 2.20 e dai dati riportati in the section “2.6.1. Microclimate”, il tipo di Lateral Boundary Conditions (LCB) che meglio approssima i risultati è l’open. La tipologia open LBC è infatti la condizione che comporta il minimo effetto dei limiti del modello sulle sue parti interne. Inoltre, in questo studio sono stati evitati i problemi di in-

stabilità numerica derivanti dal fatto che le open LBC copiano i valori dalle parti interne del modello sui limiti.

E' inoltre possibile notare come la tipologia forced non conduce, in questo caso specifico, ad una predizione affidabile delle variabili micrometeorologiche. In particolare, la temperatura dell'aria viene sottostimata di circa 2-3 K. Anche se le forced LBC possono essere considerate le più stabili perché i valori limite usati per il modello 3D sono ottenuti attraverso il modello monodimensionale, il profilo 1D sembra essere non rappresentativo delle condizioni medie, causando un certo errore. Un approccio differente occorre per la tipologia cyclic: essa assume che le condizioni medie a monte del modello sono simili a quelle caratterizzanti il modello stesso ed i valori in uscita sono usati per definire quelli in ingresso. Questa tipologia di LBC conduce tuttavia ad una differenza tra i valori predetti e misurati di circa 2-3 K.

2.6.3. Outdoor thermal comfort

Oltre alla valutazione del microclima, tra le finalità del software ENVI-met vi è anche la valutazione dell'outdoor thermal comfort. Per questa ragione tra i suoi output figura il Predicted Mean Vote (PMV) [47]. Questo indice, sviluppato per ambienti indoor, è uno degli indici usati più frequentemente in biometeorologia [13][158] ed è stato adattato agli ambienti esterni attraverso la parametrizzazione dei flussi radiativi operata da Jendritzky et al. [159]. Esso predice il valore medio dei voti di un largo gruppo di persone esposte allo stesso ambiente termico e sei parametri sono richiesti per la sua valutazione: temperatura dell'aria, temperatura media radiante, velocità del vento, umidità relativa, tasso metabolico ed isolamento termico del vestiario. Esso è basato su una scala di 7 valori che va da -3 (molto freddo) to +3 (molto caldo) dove 0 rappresenta la condizione di neutralità.

Al fine di valutare la capacità del software di predire l'outdoor thermal comfort, contemporaneamente alle misure micrometeorologiche è stata quindi effettuata una field survey che ha visto la compilazione, da parte di individui scelti casualmente, di questionari strutturati (in accordo con l'ISO 10551 [48]). Gli intervistati sono sempre stati introdotti circa le tematiche affrontate ed in questi questionari è stato chiesto loro di giudicare la loro percezione termica attraverso la stessa scala del PMV: la cosiddetta ASHRAE 7-point scale [16] (cold (-3), cool (-2), slightly cool (-1), neutral (0), slightly warm (+1), warm (+2) and hot (+3)). Allo stesso tempo, sono state richieste informazioni personali quali genere, età, peso, altezza, tempo di residenza, tempo di esposizione, vestiario, attività. Inoltre per avere un voto sulla percezione termica quanto più possibile legato alle variabili ambientali, sono stati considerati intervistati che si trovavano sempre ad una distanza inferiore ai 3 m rispetto al punto di misura considerato [30][160] e le misure micrometeorologiche sono state effettuate ad un'altezza di 1.1 m [79]. Tale valore rappresenta infatti la posizione del centro di gravità del corpo umano per soggetti in piedi e questa assunzione deriva dalle informazioni date ad ENVI-met per il calcolo del PMV. Esse possono essere considerate una media delle risposte date dagli intervistati sul tasso metabolico e sul vestiario: pertanto in questa ricerca l'outdoor thermal comfort è stato valutato attraverso simulazioni numeriche per un soggetto fermo in piedi (con un metabolic rate di 70 W/m^2) e con un isolamento termico del vestiario di 0.40 clo per il periodo estivo e di 0.95 clo per quello invernale.

Le Figs. 2.21-2.22 mostrano quindi, con riferimento a 3 differenti momenti di una giornata estiva e di una invernale, il confronto tra i valori forniti come output da ENVI-met ed il valore medio dei voti dati dagli intervistati per il medesimo punto di misura e per lo stesso momento. Va infatti detto che tale valore medio non si riferisce ad un intero periodo ma ad uno specifico orario. Per esempio durante la mattinata l'analisi per il punto 1 è stata effettuata alle 09:15, per il punto 2 alle 09:27, per il punto 3 alle 10:15... E per ogni orario sono stati raccolti 20 questionari.

Figura 2.21. Confronto tra i valori del PMV predetti dal software ed i valori medi dei voti dati dagli intervistati durante la field survey, nel giorno 13 febbraio 2014.

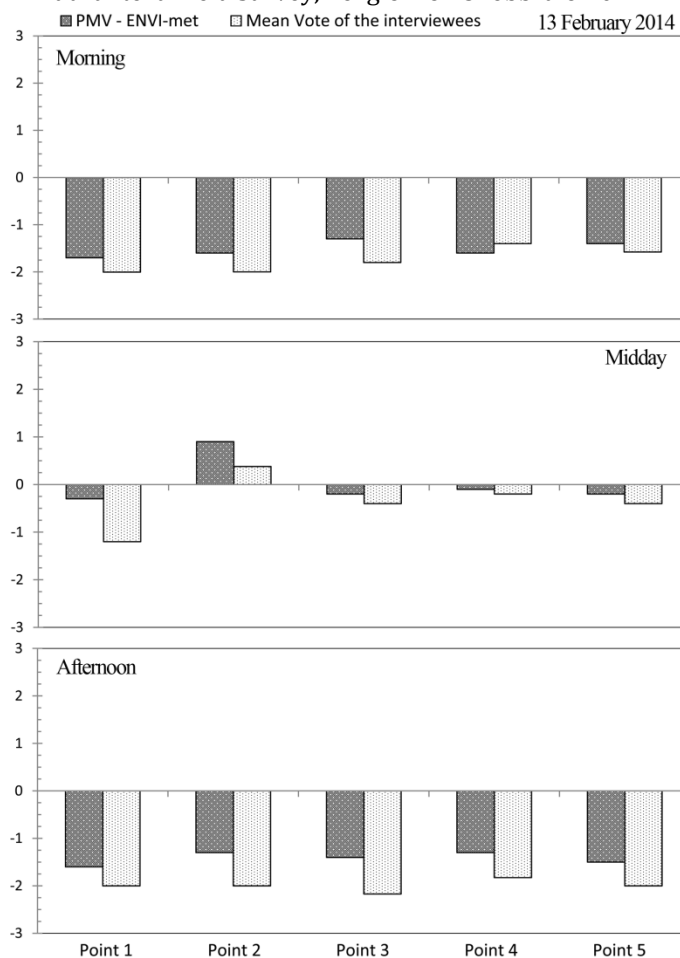
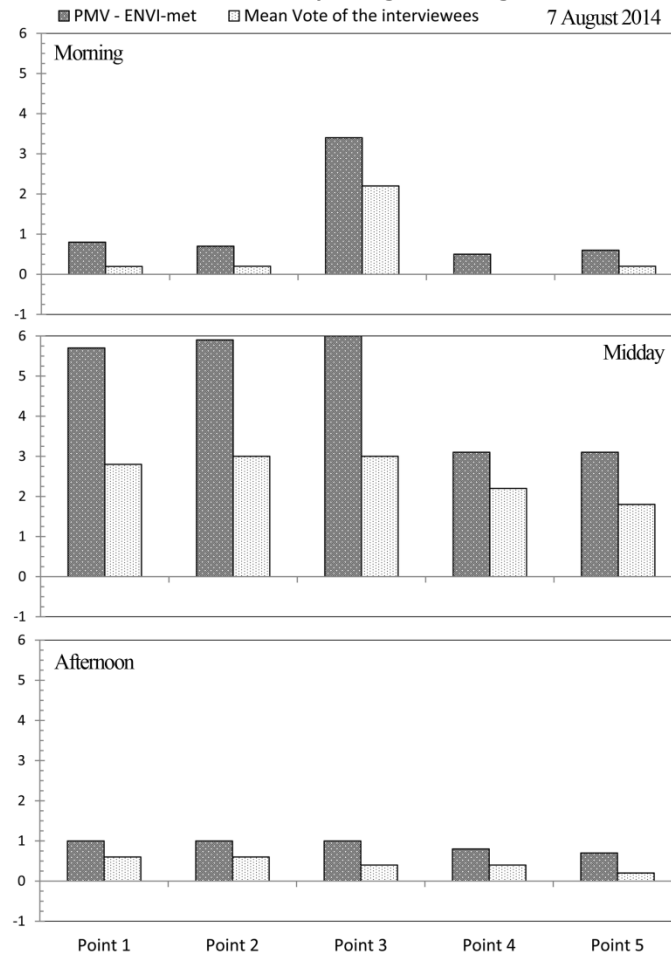


Figura 2.22. Confronto tra i valori del PMV predetti dal software ed i valori medi dei voti dati dagli intervistati durante la field survey, nel giorno 7 agosto 2014.



In particolare è possibile notare come, per il 13 Febbraio 2014 (Fig. 2.21), i valori risultano accettabili con deviazioni che generalmente non superano l'unità. La media dei voti dati dagli intervistati risulta poi essere, ad eccezione di due casi, sempre superiore rispetto al valore predetto dal software denotando un maggiore discomfort. Ciò può essere una conseguenza del fatto che il PMV è stato originariamente creato per valutare il comfort in ambiente indoor dove le condizioni termofisiche possono essere variate attraverso impianti di climatizzazione in accordo con le esigenze. Differentemente all'esterno, a causa dei fenomeni naturali, vengono rilevate variazioni più ampie di quelle grandezze che influenzano la percezione termica delle persone. Tra queste è possibile annoverare la temperatura media radiante, la radiazione solare, la temperatura dell'aria, la velocità del vento e, in misura minore, l'umidità. Da questo punto di vista va ricordato anche che la temperatura media radiante, la velocità del vento e la temperatura dell'aria sono, in ordine di contributo dato, le tre variabili micrometeorologiche che influenzano maggiormente l'outdoor thermal comfort nell'area mediterranea [26]. Nel caso del PMV, le fluttuazioni di queste variabili possono costituire un problema e influenzare la predizione della percezione termica. Il PMV è infatti uno steady-state thermal comfort index mentre le persone raramente riescono a raggiungere questa condizione: nei

paesi industrializzati esse trascorrono mediamente meno del 10% del loro tempo all'esterno ed in maniera non continuativa [161].

Nel caso estivo (Fig. 2.22) vi è invece una maggiore tolleranza verso le condizioni microclimatiche esterne, in particolare per quei punti soggetti a radiazione solare diretta durante le ore centrali della giornata. Occorre però precisare che, durante la field survey svolta, gli intervistati non potevano dare voti superiori a +3 ed è quindi possibile che tale voto medio sarebbe stato superiore con una scala più ampia. Sono stati tuttavia riscontrati in generale voti inferiori rispetto a quelli del PMV forniti da ENVI-met. Una possibile spiegazione può essere trovata nel fatto che la temperatura corporea riesce ad adattarsi meglio a condizioni di caldo attraverso la vasodilatazione che a condizioni di freddo attraverso la vasocostrizione [158]. Inoltre è lecito supporre che in questo caso intervengano fattori quali l'adattamento fisiologico alle condizioni climatiche locali (acclimatamento), l'adattamento comportamentale e sociale (regole, norme e valori) [44] ed elementi psicologici quali aspettativa e preferenza. La popolazione mediterranea è infatti maggiormente abituata a condizioni calde: la maggior parte di tale area fa infatti riferimento alla categoria Csa della classificazione dei climi di Köppen [24] e, ad esempio, ciò implica che la temperatura media del mese più caldo è superiore ai 22 °C.

Per concludere, è possibile dire che ENVI-met riesce ad approssimare in maniera soddisfacente l'andamento qualitativo del PMV valutando compiutamente differenti sollecitazioni termiche e situazione microclimatiche e permettendo quindi un confronto tra differenti configurazioni urbane. Le differenze calcolate tra l'output di ENVI-met e la media dei voti dati dagli intervistati non superano generalmente l'unità, eccetto che per le ore centrali della giornata del 7 agosto 2014 quando diviene consistente il contributo della radiazione solare. A tal proposito, è bene sottolineare come vi è la possibilità di avere valori del PMV al di fuori della scala comunemente adoperata per tale indice (che va da -3 a +3) [16][45], in quanto, come sottolineato nella guida del software [122], "the PMV value is a function of the local climate and it can reach also values above or below these limits". Deve tuttavia essere sottolineato come il confronto tra i valori predetti dal software ed i voti dati dagli intervistati è piuttosto difficile al di fuori di tale limite: la 7-point scale è infatti tradizionalmente usata come thermal sensation scale e, in accordo con Miller, è il numero ideale di categorie discrete per descrivere le sensazioni termiche. Non vi sarebbero quindi stati miglioramenti né usando una scala più piccola né usando una scala avente maggiore precisione, considerando anche il fatto che l'espressione verbale di una 10-point scale sarebbe stata piuttosto difficoltosa ed ambigua.

2.7. Configurazioni alternative delle superfici limite

Negli ultimi anni sta prevalendo una visione "smart" delle città, con una rivitalizzazione del tessuto urbano esistente attraverso il controllo del microclima e della mitigazione dei fenomeni ad esso legati, al fine di ottenere un maggiore comfort termico per migliorare la qualità della vita dei fruitori degli spazi aperti.

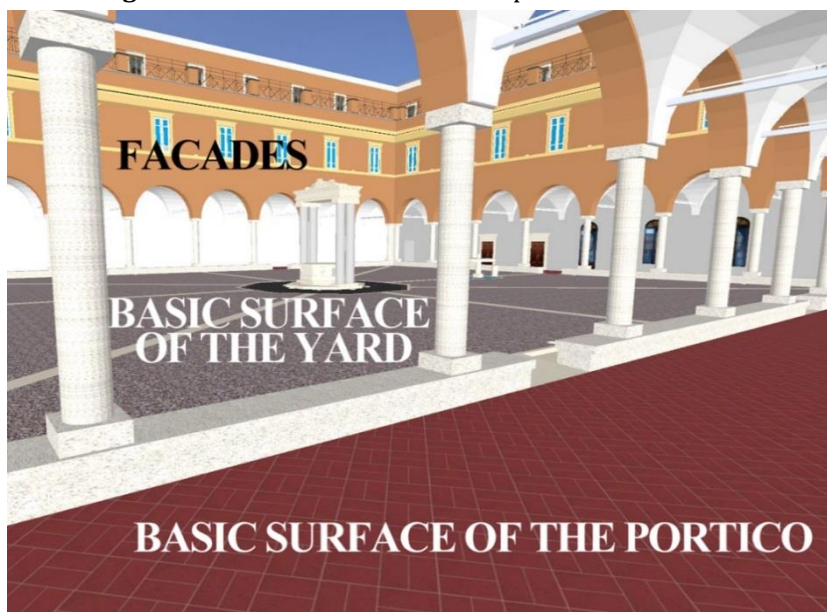
Pertanto, uno dei principali obiettivi della progettazione in contesti urbani è il dimensionamento degli spazi aperti e la configurazione dell'arredo presente, al fine di realizzare un ambiente confortevole sotto tutti gli aspetti. I parametri microclimatici, pertanto, sono molto importanti per le at-

tività che si svolgono in tali spazi e ne determinano la loro vivibilità in funzioni delle diverse condizioni climatiche stagionali.

Per garantire il comfort estivo è necessario fare in modo che flussi radiativi eccessivi non raggiungano le persone: in particolare occorre il controllo della radiazione solare diretta, riflessa e riemessa.

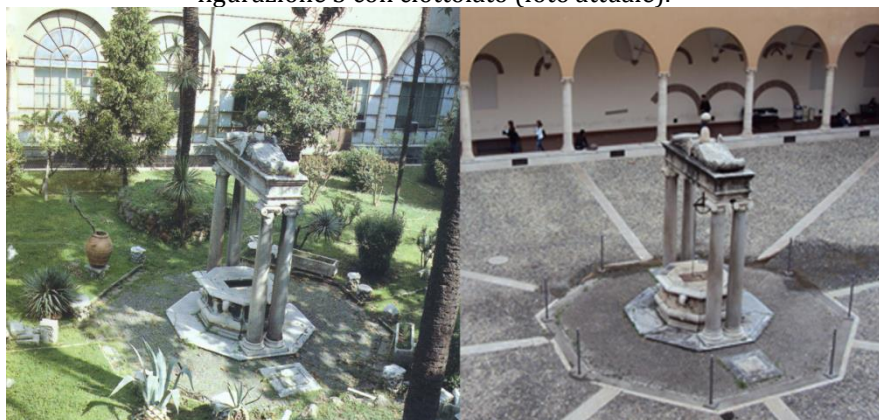
In relazione al caso studio, per esaminare i fenomeni fin qui descritti con l'intenzione di migliorare il comfort termico del chiostro, sono state proposte diverse soluzioni per i materiali costituenti le superfici limite (Fig. 2.23), tra cui una configurazione che vede la presenza di un tipico giardino all'italiana.

Figura 2.23. Identificazione delle superfici limite del chiostro.



Questa scelta non è stata casuale perché in passato il chiostro era caratterizzato proprio da questa conformazione, come è testimoniato dalla foto in Fig. 2.24.

Figura 2.24. Chiostro: a sinistra la Configurazione 1 con giardino (foto risalente agli anni '90), a destra la Configurazione 5 con ciottolato (foto attuale).



In altre configurazioni è stato invece ipotizzato un particolare rivestimento [162] sviluppato con lo scopo di ottimizzare il coefficiente di albedo dei tetti di edifici collocati nei centri storici senza alterarne l'aspetto. Tale ottimizzazione mirava ad un controllo dell'energia termica trasferita all'interno dell'edificio per migliorarne le prestazioni energetiche, specialmente in estate. Per tale rivestimento sono state in particolare analizzate le proprietà termiche ed ottiche di pigmenti e leganti di argilla, caratterizzate dal possedere, nella regione del visibile, le stesse caratteristiche delle tegole tradizionali e nelle altre regioni dello spettro solare un elevato coefficiente di riflessione. Nella scelta dei materiali, in particolare leganti e pigmenti, sono poi stati preferiti quelli da costruzione tradizionali e naturali, reperibili a cifre non elevate. Di conseguenza è stato adoperato un legante a base di silicato di potassio, con alta permeabilità al vapore d'acqua, contenente inoltre biossido di titanio TiO_2 . In qualità di pigmento viene invece usato ossido di ferro giallo (indicato con Y), rosso (indicato con R) e marrone (indicato con B).

Così facendo si è voluto contribuire al miglioramento dell'efficienza energetica degli edifici ed al miglioramento delle condizioni termoigrometriche all'interno degli stessi, con particolare riferimento agli edifici di interesse storico, senza però tener conto delle ricadute sul microclima esterno agli edifici stessi.

In questo caso si è scelto la tipologia di rivestimento "N1C", dalle caratteristiche riportate in Tab. 2.15. La composizione dello stesso prevede che, per 100 g di legante opaco, devono essere inseriti 7.2 g di ossido di ferro giallo e 0.6 g di ossido di ferro rosso. In Tab. 2.15 è possibile apprezzare i valori della riflettenza per vari intervalli di lunghezze d'onda ed il valore dell'emissività nell'infrarosso del rivestimento scelto:

Tabella 2.15. Caratteristiche del rivestimento N1C adoperato.

Composizione [g]	
Ossido di ferro giallo Y	7.2
Ossido di ferro rosso R	0.6
Ossido di ferro marrone B	-
Legante opaco	100.0
Riflettanza [%]	
300-380 nm (UV)	7.9
380.5-780 nm (VISIBLE)	58.5
781-2500 nm (NIR)	79.6
300-2500 nm (SOLAR)	66.0
Emissività [%]	
IR	0.89

Si può notare come la riflettenza risulti essere maggiore nell'infrarosso e come la stessa assuma un valore minore nel visibile.

Le configurazioni studiate risultano quindi essere le seguenti:

- Configurazione 1: la prima vede la presenza di un tipico giardino all'italiana con piante di arancio, palme e cespugli. Pertanto è un intervento confinato alle sole superficie di calpestio del cortile del chiostro;

- Configurazione 2: anche in questo secondo caso si è ipotizzato un intervento relativamente alla pavimentazione, aggiungendo al ciottolato attuale il rivestimento a base di silicato di potassio, biossido di titanio ed ossidi di ferro prima descritto;
- Configurazione 3: nella terza configurazione esaminata si ipotizza la presenza del suddetto giardino ed il rivestimento viene applicato anziché sul limite orizzontale, alla superficie interna delle pareti. Si è quindi intervenuto congiuntamente su queste ultime e sulla superficie di calpestio;
- Configurazione 4: in quest'ultimo caso si ipotizza di intervenire sulle superfici verticali ed orizzontali della struttura ponendo ovunque il rivestimento descritto;
- Configurazione 5: rappresenta lo stato attuale del chiostro esaminato.

Per individuare le caratteristiche delle piante utilizzate nelle configurazioni 1 e 3, vengono poi riportate in Tab. 2.16 l'altezza z_p , il valore del coefficiente d'albedo α_F e la "Leaf Area Density" (LAD).

Tabella 2.16. Altezza e valori della Leaf Area Density per le piante delle configurazioni 1 e 3.

	Arancio	Palma	Cespuglio	Erba
LAD 1 [$z/z_p=0.1$]	0.000	0.000	0.100	0.300
LAD 2 [$z/z_p=0.2$]	0.000	0.000	0.150	0.300
LAD 3 [$z/z_p=0.3$]	0.000	0.000	0.300	0.300
LAD 4 [$z/z_p=0.4$]	0.070	0.000	0.400	0.300
LAD 5 [$z/z_p=0.5$]	0.275	0.000	0.650	0.300
LAD 6 [$z/z_p=0.6$]	0.500	0.000	0.700	0.300
LAD 7 [$z/z_p=0.7$]	1.060	0.120	0.850	0.300
LAD 8 [$z/z_p=0.8$]	1.000	1.100	0.750	0.300
LAD 9 [$z/z_p=0.9$]	0.850	1.300	0.550	0.300
LAD 10 [$z/z_p=1.0$]	0.000	0.000	0.000	0.000
z_p	8.000	15.000	1.000	0.050
α_F	0.200	0.200	0.200	0.200

In Tab. 2.17 vengono infine riassunte le proprietà termofisiche (emissività ε_s e coefficiente di albedo α_s) dei materiali costituenti le superfici limite della struttura nelle varie configurazioni studiate.

Tabella 2.17. Proprietà termofisiche dei materiali usati per le superfici limite del chiostro.

	Intonaco di calce tinteggiato	Materiale ad elevato coefficiente di albedo	Ciottolato	Piastrelle di ceramica
ε_s	0.900	0.890	0.900	0.880
α_s	0.270	0.660	0.400	0.370

2.8. Simulazioni

Per confrontare le varie strategie di mitigazione sono state effettuate delle simulazioni con il software ENVI-met. Per questa ragione è stato costruito un modello tridimensionale del chiostro di San Pietro in Vincoli ed è stata creata una griglia di calcolo di (27 x 30) celle in orizzontale e di 29 celle in verticale; la spaziatura orizzontale è poi di 0.5 m mentre quella verticale è di 0.5 m per $0 \leq z \leq 3$ m e determinata, per altezze superiori, attraverso la relazione che segue:

$$h_{C(j)} = h_{C(j-1)} + s \cdot h_{C(j-1)} \quad (28)$$

Nell'Eq. (28) con s si indica il fattore di estensione, posto pari al 20%.

Nelle simulazioni, effettuate ogni volta con un time step di 2 s, sono state poi variate le soluzioni costruttive per i limiti verticali ed orizzontali del sito studiato mentre non sono stati variati gli input parameters meteorologici e ambientali e le impostazioni per il calcolo del PMV. Essi sono riportati nella Tab. 2.18 che segue:

Tabella 2.18. Input parameters per le simulazioni in ENVI-met.

	Summer	Winter
Main data		
Wind speed in 10 m above ground [m/s]	9.16	10.29
Wind direction [N=0 or 360, E=90, S=180, W=270]	146.1	35.0
Roughness length Z_0 at reference point [m]	1	1
Initial temperature atmosphere [K]	302	280
Specific humidity in 2500 m [g water/kg air]	7	8
Relative humidity in 2 m [%]	35	55
Building properties		
Inside temperature [K]	299	293
Heat transmission walls [W/m ² K]	1.25	1.25
Heat transmission roofs [W/m ² K]	1.54	1.54
Albedo walls [ad]	0.27/0.66*	0.27/0.66*
Albedo roofs [ad]	0.22	0.22
Settings for soil		
Initial temperature upper layer (0-20 cm) [K]	292	275
Initial temperature middle layer (20-50 cm) [K]	291	277
Initial temperature deep layer (below 50 cm) [K]	289	278
Relative humidity upper layer (0-20 cm) [%]	50	50
Relative humidity middle layer (20-50 cm) [%]	60	60
Relative humidity deep layer (below 50 cm) [%]	60	60
Clouds		
Fraction of low clouds [x/8]	0	0
Fraction of medium clouds [x/8]	0	0
Fraction of high clouds [x/8]	0	0
Settings for PMV-calculation		
Walking speed [m/s]	0.0	0.0
Metabolic rate [W/m ²]	70	70
Mechanical factor	0.0	0.0
Thermal resistance of clothing [clo]	0.40	0.95

*Questo valore dipende dalle scelte fatte nelle varie configurazioni.

Con riferimento alla Tab. 2.18, i main data sono stati inseriti nel software al fine di riprodurre una tipica giornata estiva ed una invernale.

In particolare la velocità del vento a 10 m di altezza è stata determinata attraverso l'Eq. (29)[163]:

$$R = \frac{v}{v_{10}} \quad (29)$$

In questo caso, considerando che viene esaminata un'area urbana e facendo per v riferimento al valore in Tab. 2.18, R assume il valore 0.36 [163] e conseguentemente v_{10} assume i valori di 9.16 e 10.29.

Per la direzione del vento sono stati scelti quei valori rappresentativi della direzione dalla quale esso proviene con maggiore frequenza; la scelta della lunghezza di rugosità aerodinamica Z_0 è invece una conseguenza della collocazione in area urbana del sito studiato.

E' necessario poi precisare che il valore della temperatura iniziale dell'atmosfera viene dato in termini di temperatura potenziale, riconducibile a quella assoluta attraverso l'Eq. (30):

$$\theta = T_A \cdot \left(\frac{1000}{p_1} \right)^K \quad (30)$$

dove:

- θ è la temperatura potenziale [K];
- T_A è il valore della temperatura dell'aria [K];
- P_1 è la pressione il cui valore è usato per determinare T_A [hPa];
- $K=0.286$.

Per quanto concerne la scelta delle building properties, questa deriva dall'osservazione diretta del sito mentre la temperatura degli ambienti interni è stata impostata pari a 299 e 293 K per il caso estivo ed invernale rispettivamente.

Anche i dati settati per il terreno sono stati inseriti in accordo con quelli misurabili in area mediterranea in estate [164]; la copertura nuvolosa è stata invece impostata pari a 0/8 a bassa, media ed alta quota al fine di riprodurre giornate caratterizzate da cielo sereno e da valori elevati di radiazione solare.

Infine, per il calcolo del PMV, è stata considerata la sensazione termica di un individuo che staziona in piedi nel sito esaminato (con un tasso metabolico di 70 W/m²) mentre la resistenza termica dell'abbigliamento è stata supposta essere 0.40 clo per il periodo estivo e 0.95 per quello invernale. Tali valori derivano dall'osservazione diretta delle persone che frequentano il sito in studio.

2.9. Risultati

Nella sezione seguente si opera il confronto tra i valori che le variabili microclimatiche assumono nella "configurazione 5", quella attualmente in uso nel chiostro e quelli che le stesse assumono nelle varie configurazioni alternative proposte.

Le variabili microclimatiche prese in considerazione sono la temperatura media radiante, la temperatura dell'aria, l'umidità relativa e la velocità del vento. Queste vengono valutate con riferimento alle giornate del 7 agosto 2012 e del 6 febbraio 2012, rappresentative rispettivamente di un'ondata di caldo estiva e di una di freddo invernale.

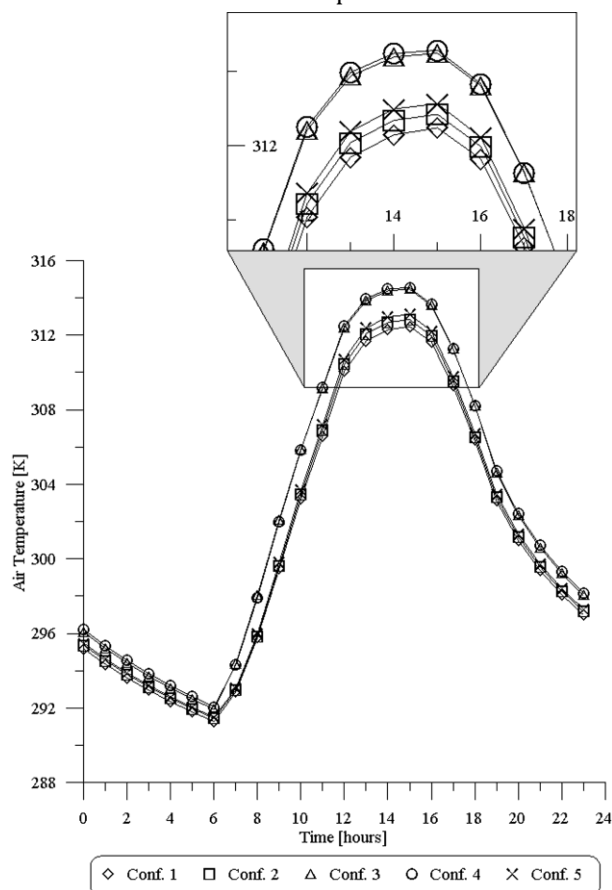
Per il punto 1 di Fig. 2.9 sono stati graficati i valori delle grandezze prese in considerazione, mentre per i punti 2 e 3 sono riportati i valori di tali grandezze rispettivamente nelle riassuntive Tab. 2.19 e Tab. 2.20. I grafici relativi all'irradiazione globale non sono stati riportati in quanto i valori sono molto simili per tutte le configurazioni studiate.

2.9.1. Caso estivo

Seguono i grafici relativi al punto 1 (Fig. 2.9). La prima variabile ad essere esaminata è la temperatura dell'aria.

Si riporta quindi in Fig. 2.25 l'andamento di questa grandezza con riferimento alla giornata del 7 agosto 2012.

Figura 2.25. Grafico relativo alla temperatura dell'aria nel caso estivo.



Dall'andamento del grafico si evince come la configurazione più vantaggiosa in termini di temperatura dell'aria sia quella che prevede la presenza del tipico giardino all'italiana sulla superficie di calpestio.

Questo comporta infatti una diminuzione della temperatura durante le ore più calde della giornata di circa 0.7 K rispetto alla configurazione attuale.

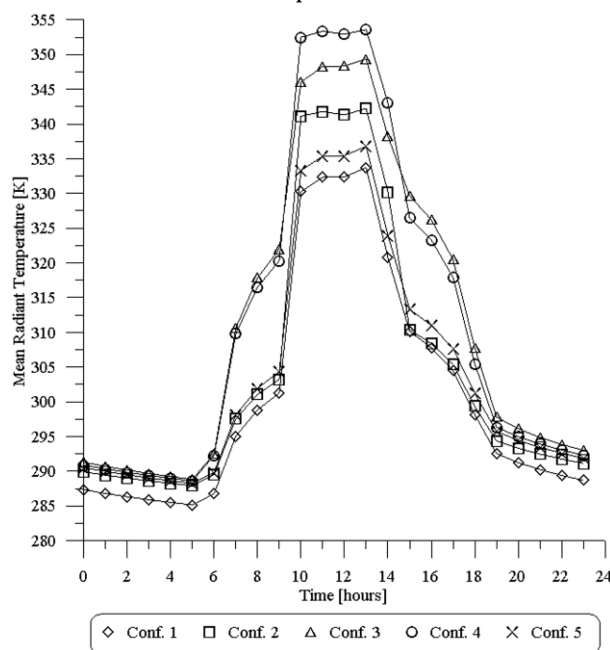
È possibile apprezzare una diminuzione del valore relativo a tale variabile anche adoperando, con riferimento alla pavimentazione, il rivestimento precedentemente descritto. Questa soluzione comporta infatti un decremento della temperatura dell'aria rispetto alla configurazione attuale di circa 0.3 K.

La situazione peggiora, però, nei casi in cui tale rivestimento viene applicato anche sulle superfici opache verticali della struttura. Tale aumento della temperatura è stato stimato in circa 1.4 K nel

caso di presenza del giardino ed in circa 1.5 K nel caso in cui il rivestimento dovesse essere applicato anche sulla superficie di calpestio.

La seconda variabile ad essere presa in considerazione è la temperatura media radiante. Si riporta quindi in Fig. 2.26 il grafico relativo alle 24 ore della giornata estiva esaminata.

Figura 2.26. Grafico relativo alla temperatura media radiante nel caso estivo.



Si può notare come la configurazione che vede i valori più bassi di temperatura media radiante sia quella con giardino all'italiana e senza applicazione del rivestimento sulle pareti.

Quest'ultimo intervento comporta infatti un aumento dei valori relativi a tale variabile: nel caso in cui il rivestimento dovesse essere applicato sia sulle pareti che sulla pavimentazione si ha un aumento della temperatura media radiante di circa 22 K rispetto alla configurazione più vantaggiosa. Ciò è dovuto al fatto che la struttura chiusa del chiostro fa in modo che buona parte della radiazione emessa venga riassorbita proprio dai limiti verticali ed orizzontale dell'ambiente studiato.

In Fig. 2.27 è possibile apprezzare l'andamento dell'umidità relativa.

L'andamento di tale variabile risulta essere strettamente correlato a quello della temperatura dell'aria. Si può osservare infatti come le configurazioni cui corrispondono valori di quest'ultima più bassi siano quelle caratterizzate da valori dell'umidità relativa maggiori. Viceversa quelle che invece vedono valori di umidità inferiori sono quelle cui competono valori della temperatura dell'aria superiori e quindi sono quelle configurazioni con i limiti verticali rivestiti. Si parla comunque di differenze che possono raggiungere al massimo valori del 2.5%. Valori di umidità relativa superiori a quelli della configurazione attuale si hanno chiaramente per la configurazione con il giardino all'italiana in virtù dell'evaporazione del terreno e della traspirazione delle piante.

In maniera analoga a quanto fatto per le altre variabili considerate, si studia con l'ausilio della Fig. 2.28 come le differenti configurazioni influenzano la velocità del vento.

Figura 2.27. Grafico relativo all'umidità relativa nel caso estivo.

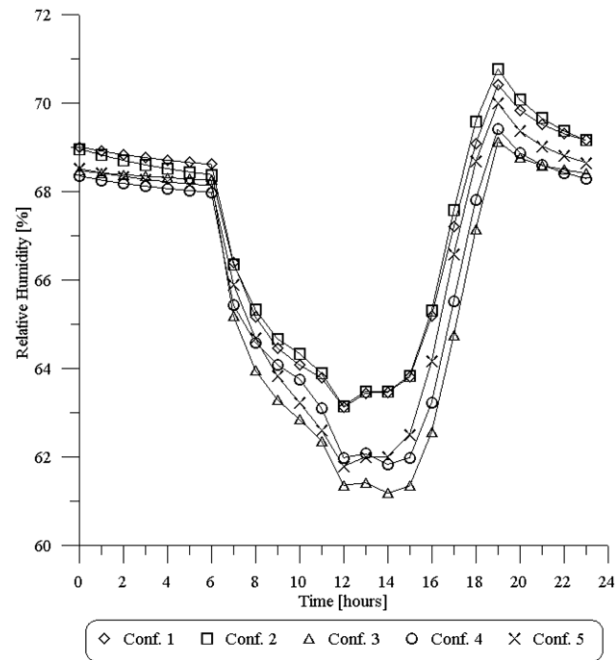
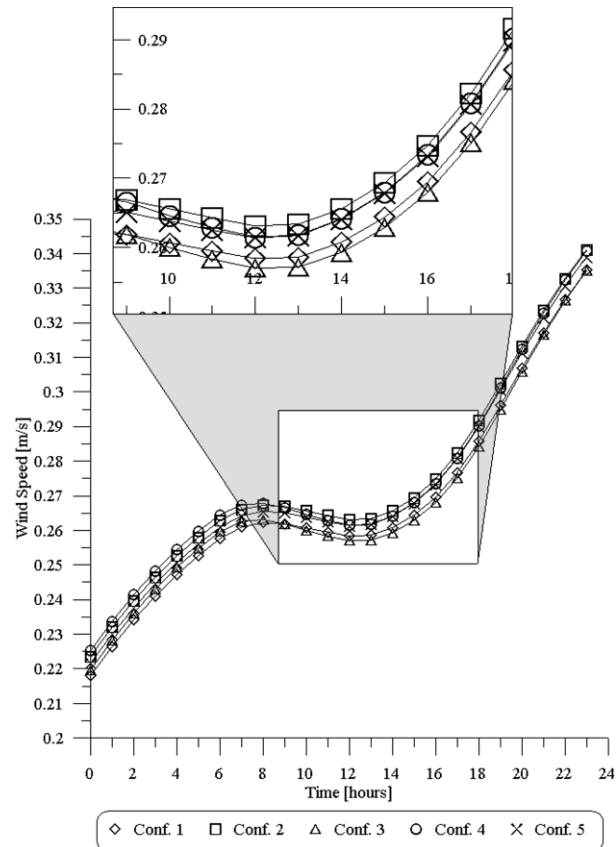


Figura 2.28. Grafico relativo alla velocità del vento nel caso estivo.

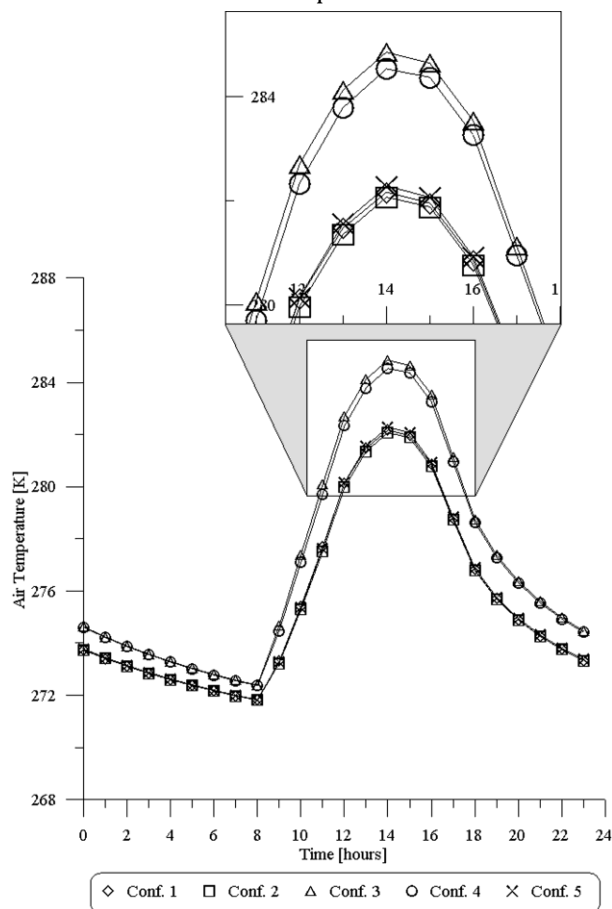


Si può osservare come i valori più bassi della stessa si riscontrano nella configurazione 1 e nella configurazione 3, le quali vedono la presenza di elementi vegetali. Gli alberi modificano infatti, a volte in modo significativo, le caratteristiche di ventosità locale in termini di velocità e direzione. Le varie configurazioni presentano comunque differenze dell'ordine di 0.01 m/s.

2.9.2. Caso invernale

Anche per la giornata 6 febbraio 2012 si riporta l'andamento delle variabili in funzione delle ore cominciando con la temperatura dell'aria in Fig. 2.29.

Figura 2.29. Grafico relativo alla temperatura dell'aria nel caso invernale.

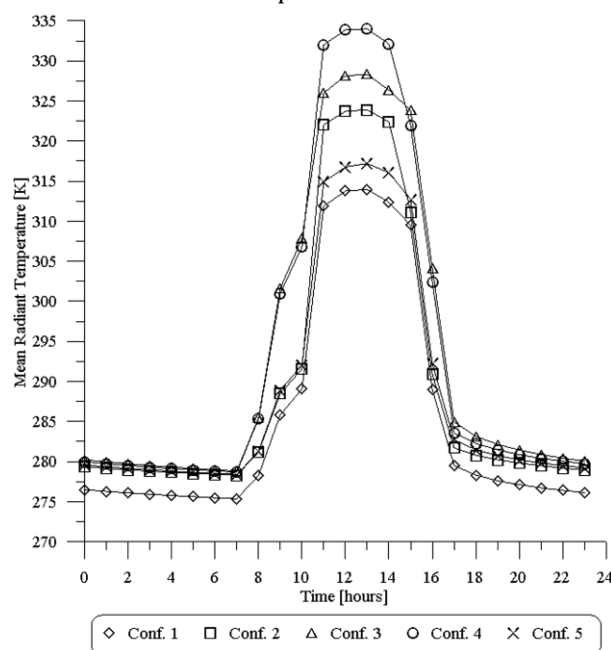


Dallo studio della stessa si evince come i valori più bassi afferiscano alla configurazione che vede i limiti verticali della struttura inalterati e la presenza del rivestimento sulla superficie di base. Rispetto a questa configurazione, in quella attuale ed in quella con giardino all'italiana si hanno invece incrementi della temperatura dell'aria dell'ordine di 0.2 K e 0.1 K durante le ore centrali della giornata. L'applicazione del rivestimento sulla superficie di calpestio tende infatti a fare in modo che parte del flusso radiativo incidente venga riflesso senza andare ad investire in maniera significativa le pareti (cosa che avviene nelle configurazioni in cui il rivestimento viene applicato anche sulla superficie interna dei limiti verticali della struttura). Ciò porta quindi ad un decremento della tempe-

ratura del parterre e conseguentemente ad una diminuzione della temperatura dell'aria. Viceversa nel caso in cui tale rivestimento dovesse essere applicato anche sui limiti verticali, si avrebbe un incremento della temperatura delle superfici opache e quindi dell'aria. Si ricorda che essa si riscalda o si raffredda perché a contatto con corpi che si riscaldano o si raffreddano. Durante le ore notturne invece la configurazione caratterizzata dai valori di temperatura dell'aria più bassi risulta essere quella con vegetazione e senza applicazione del rivestimento su superficie alcuna.

Per quanto riguarda la temperatura media radiante (Fig. 2.30), i suoi valori risultano essere chiaramente inferiori rispetto a quelli riscontrati nel caso estivo.

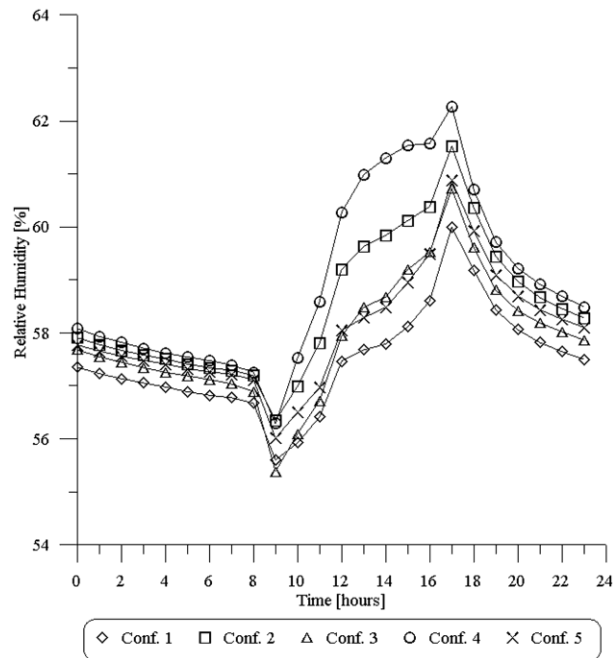
Figura 2.30. Grafico relativo alla temperatura media radiante nel caso invernale.



Come visto per quest'ultimo, è possibile notare come la presenza del rivestimento in silicato di potassio e pigmenti di biossido di titanio tenda a portare ad un aumento di tale variabile (in particolare nel caso in cui detto rivestimento viene applicato sui limiti verticali). Si fa poi notare come, nella configurazione attuale, si raggiungono valori di temperatura media radiante di poco superiori ai 315 K durante le ore più calde della giornata e come i valori di tale grandezza diminuiscano di circa 2-3 K nel caso con il solo giardino.

Mediante la Fig. 2.31 si esamina invece l'andamento delle curve dell'umidità relativa.

Figura 2.31. Grafico relativo all'umidità relativa nel caso invernale.

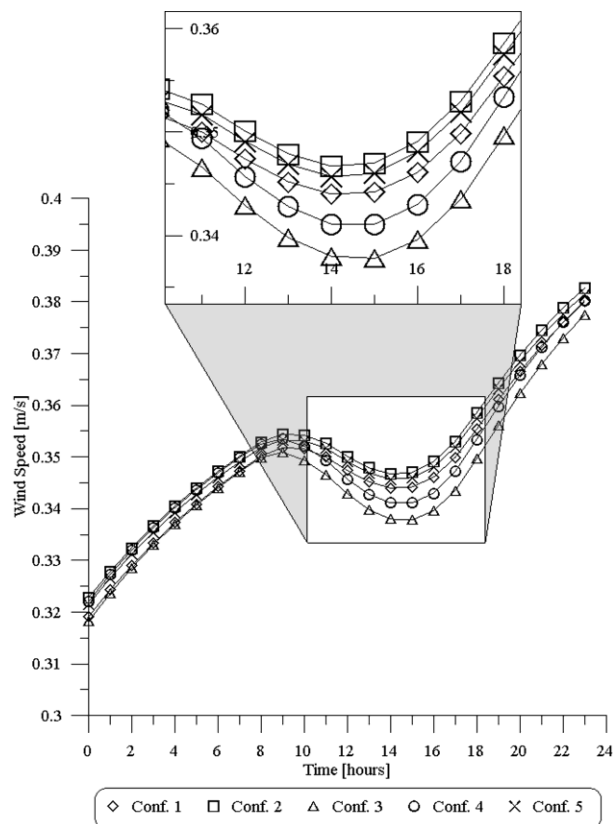


Si può notare un decremento della stessa durante le ore notturne: ciò è dovuto al fatto che i corpi durante tale periodo della giornata tendono a raffreddarsi e conseguentemente il vapore presente nell'aria tende a condensare. Durante le ore centrali della stessa invece la radiazione solare porta i corpi a scaldarsi ed il vapore che prima era condensato tende ad evaporare aumentando quindi il valore dell'umidità relativa.

La quarta variabile di natura meteorologica ad essere esaminata è la velocità del vento (Fig. 2.32).

Anche nel caso invernale si può notare come la velocità del vento tenda ad assumere valori inferiori nei casi in cui si ha la presenza di alberi o elementi vegetali in genere. Tra le varie configurazioni non si riscontrano comunque differenze superiori a 0.01 m/s. Si mette inoltre in evidenza come le velocità nel caso invernale risultino essere di circa 0.08 m/s superiori al caso estivo. Ciò è comunque una conseguenza del fatto che la velocità del vento impostata nel caso invernale risultava essere superiore a quella caratterizzante il periodo estivo.

Figura 2.32. Grafico relativo alla velocità del vento nel caso invernale.



Seguono le Tabs. 2.19-2.20 riassuntive delle grandezze esaminate per i punti 2 e 3 (Fig. 2.9) in entrambi i periodi stagionali. Per il punto 2 si notano valori della velocità del vento più elevati perché in prossimità del lato maggiormente ventilato del chiostro compreso tra i punti di accesso.

Tabella 2.19. Dati riassuntivi per il punto 2.

		Caso estivo			Caso invernale		
		Orario					
		10:00	14:00	18:00	10:00	14:00	18:00
Air Temperature [K]	Conf. 1	303.24	312.46	306.45	275.45	282.20	276.90
	Conf. 2	303.54	312.93	306.66	275.36	282.23	276.90
	Conf. 3	305.91	314.52	308.30	277.46	284.92	278.84
	Conf. 4	305.98	314.74	308.34	277.23	284.74	278.76
	Conf. 5	303.72	313.14	306.82	275.42	282.35	276.97
Mean Radiant Temperature [K]	Conf. 1	298.21	324.78	294.21	282.27	286.63	273.58
	Conf. 2	299.19	337.78	296.12	281.98	285.19	273.53
	Conf. 3	312.93	345.34	300.80	292.75	297.87	274.98
	Conf. 4	310.87	350.00	300.70	292.02	296.13	274.94
	Conf. 5	300.39	331.06	298.01	282.34	285.91	273.77
Relative Humidity [%]	Conf. 1	64.36	63.41	69.06	55.52	57.55	58.43
	Conf. 2	64.46	63.21	69.47	56.34	59.10	59.39
	Conf. 3	63.25	61.40	67.37	55.55	58.40	58.86
	Conf. 4	63.81	61.60	67.84	56.65	60.34	59.74
	Conf. 5	63.66	62.24	68.76	55.95	58.43	59.11
Global Radiation [W/m²]	Conf. 1	58.18	968.46	10.99	37.50	42.06	0.00
	Conf. 2	58.08	964.56	10.67	37.50	42.03	0.00
	Conf. 3	57.53	955.15	9.47	37.27	41.56	0.00

Wind Speed [m/s]	Conf. 4	57.44	951.99	9.26	37.27	41.53	0.00
	Conf. 5	58.07	964.50	10.64	37.50	42.02	0.00
	Conf. 1	0.56	0.57	0.62	0.72	0.71	0.73
	Conf. 2	0.59	0.60	0.65	0.75	0.74	0.75
	Conf. 3	0.56	0.57	0.62	0.72	0.70	0.72
	Conf. 4	0.59	0.60	0.65	0.74	0.73	0.75
	Conf. 5	0.59	0.60	0.65	0.75	0.74	0.75

Tabella 2.20. Dati riassuntivi per il punto 3.

		Caso estivo			Caso invernale		
		Orario					
		10:00	14:00	18:00	10:00	14:00	18:00
Air Temperature [K]	Conf. 1	303.71	312.92	306.70	275.76	282.60	277.13
	Conf. 2	303.93	313.40	306.91	275.65	282.62	277.13
	Conf. 3	306.43	315.05	308.59	277.80	285.37	279.09
	Conf. 4	306.43	315.25	308.63	277.55	285.18	279.01
	Conf. 5	304.22	313.64	307.08	275.73	282.75	277.20
Mean Radiant Temperature [K]	Conf. 1	323.50	325.14	294.06	280.71	285.25	272.59
	Conf. 2	339.89	341.49	296.83	280.49	283.70	272.54
	Conf. 3	343.77	345.97	300.48	290.17	295.52	274.08
	Conf. 4	345.72	347.24	300.91	289.41	293.58	274.03
	Conf. 5	333.07	337.05	298.72	280.87	284.76	272.92
Relative Humidity [%]	Conf. 1	63.05	62.10	68.33	53.25	55.26	56.67
	Conf. 2	63.20	61.85	68.73	54.08	56.79	57.61
	Conf. 3	61.80	59.86	66.46	53.35	55.98	57.02
	Conf. 4	62.42	60.10	66.94	54.47	57.92	57.88
	Conf. 5	61.86	60.74	67.97	53.68	56.04	57.29
Global Radiation [W/m²]	Conf. 1	1004.71	975.78	12.38	42.27	47.41	0.00
	Conf. 2	1002.96	971.84	12.02	42.27	47.37	0.00
	Conf. 3	993.51	962.36	10.68	42.01	46.84	0.00
	Conf. 4	992.03	959.18	10.44	42.01	46.81	0.00
	Conf. 5	1002.82	971.79	11.99	42.26	47.37	0.00
Wind Speed [m/s]	Conf. 1	0.28	0.32	0.34	0.35	0.36	0.37
	Conf. 2	0.28	0.31	0.34	0.36	0.36	0.38
	Conf. 3	0.28	0.32	0.34	0.35	0.36	0.37
	Conf. 4	0.28	0.32	0.34	0.35	0.36	0.38
	Conf. 5	0.28	0.31	0.34	0.36	0.36	0.38

2.9.3. Il PMV nel chiostro

I valori del PMV sono forniti come output da ENVI-met e vengono analizzate le sensazioni termiche di un individuo che staziona in piedi nel chiostro. Di conseguenza il tasso metabolico è pari a 70 W/m².

Per quanto concerne il vestiario delle persone che di solito frequentano il chiostro, l'isolamento è stato supposto essere 0.4 clo per il caso estivo e 0.95 clo per il caso invernale (1 clo = 0.155 m²K/W).

In Fig. 2.33 vengono poi riportati i risultati per i punti 1, 2, 3 di Fig. 2.9 sia per la situazione estiva che per quella invernale; vengono inoltre valutati sette differenti orari, rappresentativi della fascia quotidiana in cui il sito è frequentato. La Fig. 2.34 approfondisce invece la distribuzione del PMV nella configurazione estiva.

Figura 2.33. PMV nel caso estivo ed invernale in ciascuno dei tre punti analizzati e per ogni configurazione.

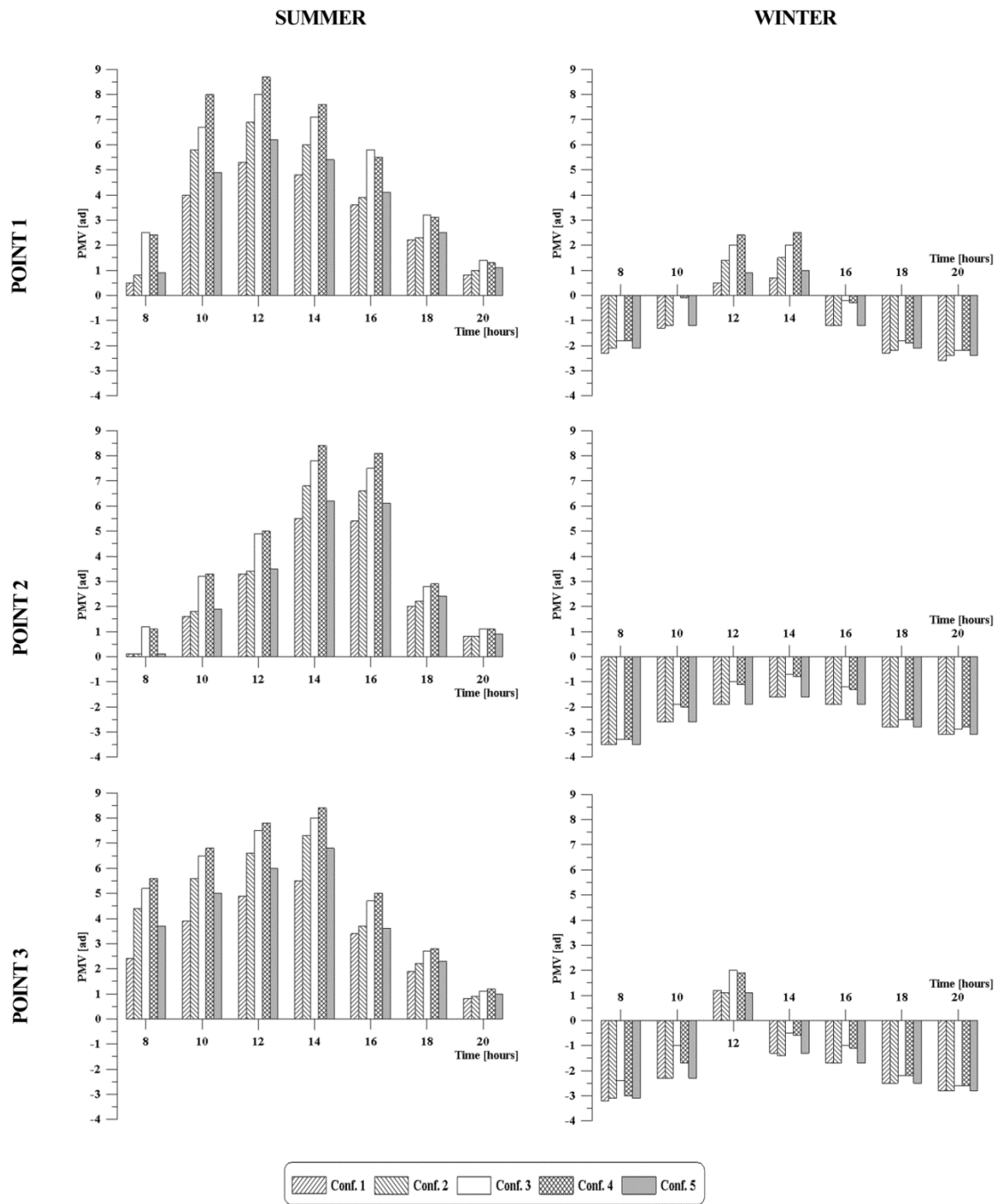
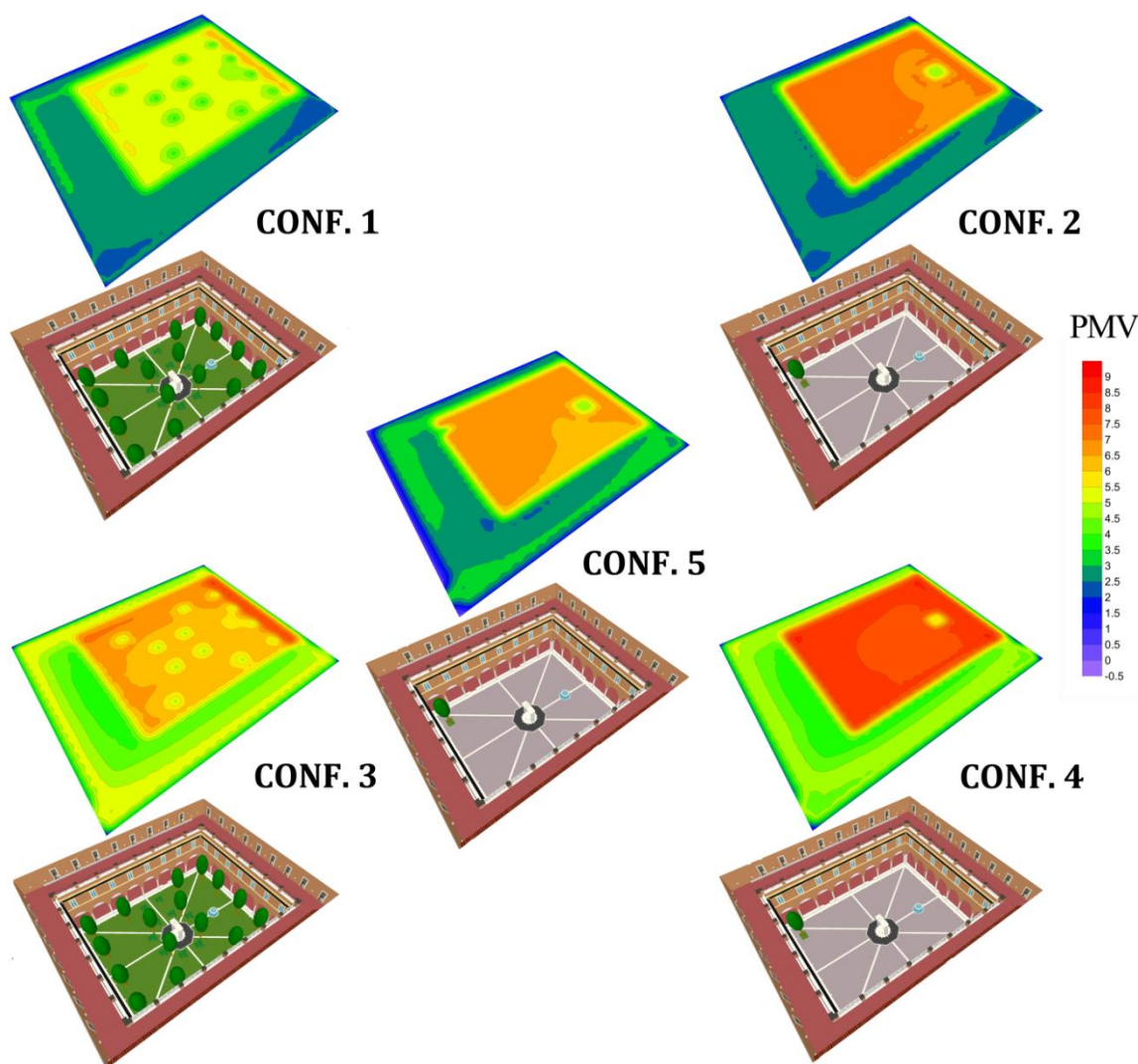


Figura 2.34. Mappe rappresentative dei valori del PMV rilevati durante il caso estivo.



2.10. Considerazioni

La radiazione solare, la velocità del vento, la temperatura dell'aria, la temperatura media radiante e l'umidità relativa giocano un ruolo rilevante nel benessere dell'individuo in ambienti outdoor. Nel presente studio si è cercato di valutare come ciascuna di queste grandezze può essere mitigata attraverso tecniche di controllo basate su diverse configurazioni delle superfici limite e quindi delle proprietà termofisiche dei materiali di rivestimento. E' evidente che occorre operare scelte architettoniche ed urbanistiche basate su studi che tengano conto del legame tra i materiali che costituiscono l'arredo urbano e le conseguenze che questi comportano sul microclima che si instaura negli spazi esterni della nostre città. Questo non solo per il comfort degli individui, ma anche perché l'effetto "isola di calore" comporta significative ricadute su questioni relative ai consumi energetici degli edifici: l'area mediterranea è stata caratterizzata negli ultimi anni da un sensibile aumento dei consumi energetici per la climatizzazione estiva [119]. Per verificare quanto detto si è preso come caso studio lo storico Chiostro della Facoltà di Ingegneria della Sapienza, cercando di migliorare le condizioni ambientali del sito studiato; Roma è una città tipicamente mediterranea caratterizzata,

da un clima caldo-umido, con estati lunghe e afose e con inverni relativamente corti e miti e quindi in inverno risulta più semplice limitare la sollecitazione termica a cui si è sottoposti, aumentando la resistenza termica del proprio vestiario o trovando riparo da agenti atmosferici, quali la pioggia, al di sotto di superfici porticate. Quindi le condizioni peggiori in termini di comfort termico sono legate al periodo estivo, caratterizzato tra l'altro da una maggiore permanenza delle persone in ambiente aperto legata al maggior numero di ore di luce disponibili.

2.10.1. Caso estivo

Temperatura media radiante: dai dati delle simulazioni effettuate per il caso studio, si nota che nelle configurazioni che vedono la presenza del giardino subisce una diminuzione del suo valore rispetto a quelle configurazioni prive di superfici verdi alla quota di calpestio. In particolare la presenza di cespugli, caratterizzati da una bassa chioma ravvicinata al suolo e da un limitato sviluppo in altezza, svolge contemporaneamente la funzione di schermo a parete e quella di barriera alla radiazione riflessa. Gli alberi, invece, fungono prevalentemente da schermi alla radiazione e solo in misura minore da schermi a parete impedendo alla radiazione solare di raggiungere le superfici laterali. Gli schermi vegetali infatti sono tra i fattori che incidono più efficacemente sul controllo della radiazione solare. Si riesce così a ridurre la temperatura percepita dall'utente tramite la riduzione sia degli scambi radiativi sole-pelle, che della radiazione riflessa. A tal proposito, oltre all'effetto di schermatura degli alberi, un contributo significativo è dato dalla presenza di superfici erbose, caratterizzate da un basso grado di riflessione. Risulta quindi evidente il vantaggio fornito dalla vegetazione anche in relazione al fatto che gli schermi vegetali uniscono, al controllo dei flussi radiativi, gli effetti di raffrescamento ed umidificazione prodotti dall'evapo-traspirazione delle foglie ed agiscono in modo positivo sulla percezione psichica dell'ambiente in cui sono collocati.

Nella configurazione caratterizzata dalla presenza del giardino e con pareti inalterate si ha inoltre una riduzione della temperatura media radiante. Si ha infatti una diminuzione della temperatura delle superfici, che porta principalmente tre differenti vantaggi: si riducono, annullano o invertono gli scambi radiativi relativamente alle radiazioni ad onda lunga e si contribuisce così al raffrescamento percepito.

Nelle simulazioni caratterizzate dalla presenza del rivestimento speciale (caratterizzato da un elevato valore del coefficiente di albedo) sulle pareti verticali delle strutture, si ha un aumento della radiazione riflessa favorendo l'accumulo di calore sensibile all'interno del chiostro durante il giorno, con un aumento della temperatura media radiante. In tale processo, solamente una piccola parte della radiazione che colpisce le pareti degli edifici viene riflessa verso il cielo a causa del ridotto sky view factor. Infatti, nel caso di edifici situati in un contesto fortemente urbanizzato, la porzione di cielo vista si riduce molto per effetto delle ostruzioni reciproche dei fabbricati.

Nel caso studio, un contributo più marginale al benessere degli occupanti del chiostro è legato alla presenza della fontana: ciò è dovuto alle dimensioni molto contenute dello specchio d'acqua. Bisogna però tenere conto della capacità che ha l'acqua (anche sotto forma di specchi poco profondi) di mantenere la temperatura superficiale inferiore a quella dell'aria o di altri tipi di superficie e del suo basso coefficiente di riflessione, che non supera il 3% nelle ore di massima radiazione. In funzione dello spessore, uno specchio d'acqua può assorbire fino all'80% della radiazione, senza au-

mentare sensibilmente la temperatura superficiale perché la superficie si raffresca per evaporazione ed il calore viene accumulato nella massa termica e dissipato di notte. Un mirabile esempio di tali tecniche per la mitigazione del microclima estivo sono i giardini di Villa Adriana, sito di epoca imperiale romana situato nel Comune di Tivoli (nei pressi di Roma). Questa fu una residenza reale a partire dal II secolo d. C. e la soluzione adottata è caratterizzata da grandi specchi d'acqua attorno ai quali si sviluppava il complesso edilizio.

Nel caso studio il contributo al raffrescamento dovuto ai fenomeni evaporativi derivanti dalla presenza di zampilli risulta però poco significativo. Gli spruzzi che scaturiscono dalla sommità della fontana risultano essere deboli e la superficie di contatto aria/acqua poco rilevante. Un esempio notevole di tale soluzione può essere apprezzato a Villa d'Este, struttura rinascimentale sita anch'essa nel comune di Tivoli, territorio ricco di sorgenti di acqua.

L'importanza della mitigazione del microclima legata alla presenza di acqua è confermata da studi che dimostrano come all'aumentare della profondità (quindi una maggiore massa e una maggiore inerzia termica) degli specchi d'acqua diminuisce la loro temperatura, perché si verifica un'attenuazione ed uno sfasamento dell'onda termica tali da ridurre l'oscillazione giornaliera della temperatura a valori che variano tra i 3 °C (con solo specchio) ed i 6 °C (con gli zampilli in funzione).

Nel caso del chiostro l'effetto derivante dalla presenza della fontana risulta essere estremamente localizzato e quindi poco influente al comfort dell'intero sito.

Temperatura dell'aria: si può notare come la configurazione che vede il rivestimento in silicato di potassio e biossido di titanio sulla superficie di calpestio porti ad un abbassamento del valore di tale variabile rispetto alla configurazione attuale. Questo perché l'elevata riflettanza del rivestimento non permette alla superficie in questione di scaldarsi eccessivamente a causa dell'assorbimento della radiazione solare. Di conseguenza diminuisce anche la temperatura dell'aria in contatto. La configurazione più vantaggiosa risulta essere quella che vede la presenza del solo giardino. Data l'elevata capacità termica del prato, esso può essere considerato una soluzione ottimale dal punto di vista del comfort termico, pur avendo caratteristiche di albedo piuttosto basse. Ciò è anche dovuto all'effetto evapotraspirativo dell'erba e può essere considerato uno dei fattori che meglio concorrono alla diminuzione dei valori di temperatura dell'aria e di temperatura media radiante. La bassa riflessione e lo scarso surriscaldamento rendono il prato un elemento da privilegiare soprattutto nel caso di luoghi in cui si svolgono attività stanziali. Il prato può assorbire circa l'80% della radiazione incidente; la parte assorbita viene impiegata per il 70% per attivare fenomeni di traspirazione, facendo sì che la temperatura della superficie non cresca. La radiazione riflessa risulta essere quindi dell'ordine del 15% e non costituisce un grosso problema per le zone adiacenti.

Velocità del vento: occorre considerare l'effetto che gli elementi vegetali hanno sulla ventilazione. Le piante sono, tra gli elementi frangivento più comunemente usati, i più efficaci e possono modificare sia la direzione che la velocità del vento. In generale, maggiore e più densa è la chioma della pianta, maggiore è il suo effetto. In estate la presenza di vento, che favorisce il raffrescamento grazie ad un maggior coefficiente convettivo, è auspicabile. Sarebbe quindi da preferire la presenza di una vegetazione non troppo fitta come gli alberi di palme, propri di queste latitudini.

PMV: Si può notare che, per il caso estivo, le differenze tra i valori del PMV tendono ad essere maggiori nelle ore in cui c'è la presenza di radiazione solare e come invece tendano a diminuire nel

tardo pomeriggio/sera. La configurazione 1 rappresenta la soluzione migliore da un punto di vista del comfort termico. Infatti in estate tale configurazione è caratterizzata dai valori più bassi del PMV. Le maggiori sollecitazioni termiche si riscontrano per le configurazioni 3 e 4, caratterizzate dal rivestimento sulle facciate; in particolare la configurazione 4, che prevede il rivestimento anche sulla superficie di base del cortile, presenta i valori più alti in assoluto del PMV. Invece la configurazione 2, in presenza di direct shortwave radiation, conduce a valori del PMV intermedi: viene riscontrato un peggioramento delle condizioni microclimatiche rispetto alle configurazioni 1 e 5, ma un miglioramento rispetto alla 3 ed alla 4. La differenza tra i valori del PMV tende a diminuire quando la radiazione è solamente diffusa.

2.10.2. Caso invernale

In un clima tipicamente mediterraneo i maggiori problemi relativi al comfort termico si hanno durante i mesi estivi. Gli aspetti termoigrometrici devono essere quindi ottimizzati per tale stagione e durante il periodo invernale il comportamento del sito analizzato sarà una diretta conseguenza delle scelte fatte.

Temperatura media radiante: è la grandezza che maggiormente risente di tali valutazioni. Le problematiche estive ed invernali sono totalmente opposte. A tal proposito le configurazioni che risulterebbero essere maggiormente vantaggiose nel periodo freddo sono quelle che vedono l'applicazione del rivestimento sui limiti verticali della struttura; ciò condurrebbe però a valori della temperatura media radiante troppo elevati in estate con marcato stress termico.

Temperatura dell'aria: durante il periodo invernale in una città come Roma non assume valori troppo rigidi. Aumentando il grado di isolamento termico del vestiario, il freddo può quindi risultare ampiamente tollerabile.

Velocità del vento: durante il periodo freddo è necessario il controllo della ventilazione. Chiamamente le piante a foglia caduca sono efficaci in estate, ma non in inverno. La scelta delle essenze arboree dovrà essere orientata verso elementi sempreverdi tipici di queste latitudini (alberi di palme e di agrumi). Nelle configurazioni con tipico giardino all'italiana proposte si ha la presenza di arbusti: essi espletano lo stesso compito degli alberi, ma ad una scala diversa. Per la riduzione della velocità del vento in un'area in cui si preveda che ci siano le persone sedute, essi sono molto più efficaci degli alberi andando ad eseguire azioni di ostruzione e filtrazione del vento.

Va inoltre tenuto conto che, nella stagione fredda, una delle necessità maggiori per la fruibilità del luogo è la presenza di spazi coperti, al riparo dalle precipitazioni atmosferiche. Tale funzione nel chiostro in esame è espletata dalla presenza del porticato.

PMV: nella situazione invernale i valori del PMV nelle varie configurazioni tendono generalmente ad essere più vicini tra loro e non si hanno sollecitazioni termiche intense come nel caso estivo. I valori più vicini a 0, valore rappresentativo della neutralità termica, sono quelli delle configurazioni 3 e 4, cioè quelle stesse configurazioni che nel caso estivo comportavano le sollecitazioni termiche maggiori. E' necessario però considerare che la città di Roma è nella categoria Csa della classificazione dei climi di Köppen-Geiger ed è quindi caratterizzata da un'estate calda, con una temperatura media del mese più caldo maggiore o uguale di 22 °C. Per queste ragioni il microclima deve essere mitigato, al fine di diminuire lo stress termico, specialmente durante l'estate. In contesti urbani

chiusi come quello esaminato (superfici caratterizzate da bassi valori dello sky view factor) la configurazione 1 sembra essere la migliore.

2.11. Materiali innovativi e canyon urbani afferenti alla Local Climate Zone LCZ 2₃

2.11.1. Selezione e descrizione del caso studio

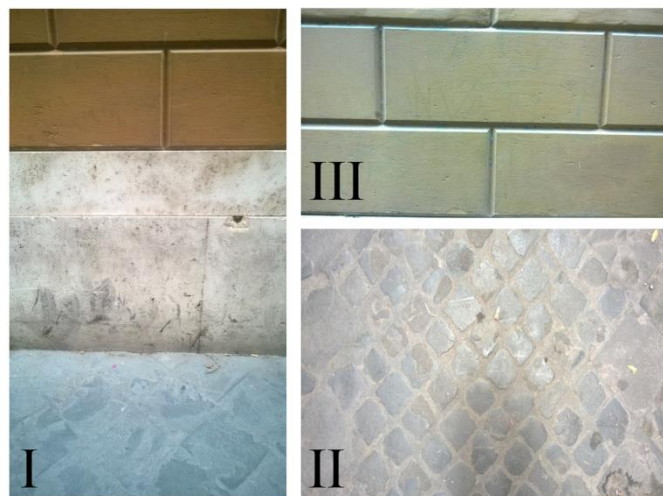
Materiali caratterizzati da elevato coefficiente di albedo sono stati testati anche in siti afferenti alla Local Climate Zone LCZ 2₃ [87]. Nell'ambito del presente studio è stato selezionato il sito di Via delle Carrozze (Fig. 2.35), localizzato nel centro di Roma. La scelta è stata fatta sulla base dei seguenti criteri: H/W tipico dei centri storici mediterranei, lunghezza del canyon sufficiente ad escludere l'influenza di altre variabili sul microclima e possibilità di effettuare le misure sperimentali senza problematiche legate ad un'eccessiva presenza di vetture o pedoni.

Figura 2.35. Localizzazione del sito di Via delle Carrozze.



Passando alla descrizione della strada, essa è composta da 4 blocchi, ognuno dei quali con una lunghezza compresa tra 65 e 70 m. Il rapporto tra l'altezza H e la larghezza W è circa 3.5, essendo i due parametri piuttosto uniformi e pari a 18 m e 5 m rispettivamente. Dal punto di vista dei materiali costituenti il sito, la pavimentazione risulta essere costituita da sanpietrini (Fig. 2.36-I) mentre le facciate sono caratterizzate da un basamento in travertino e da malta color ocra o tendente al rosso (Fig. 2.36-II,III).

Figura 2.36. Materiali costituenti la configurazione attuale del sito esaminato.



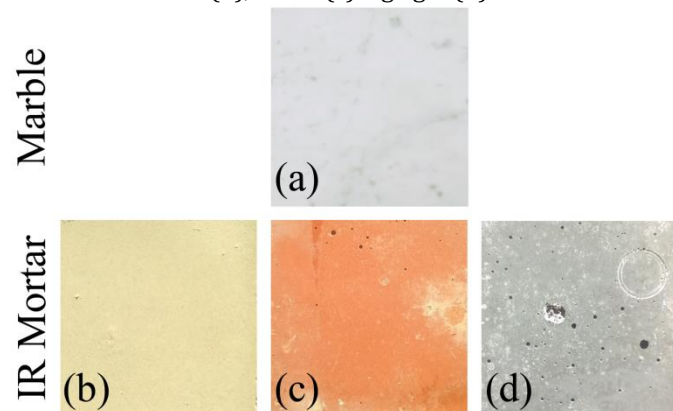
2.11.2. Caratterizzazione dei materiali innovativi e configurazioni analizzate del sito

Per cercare di provvedere all'ottimizzazione microclimatica del sito, sono stati sviluppati materiali innovativi applicabili in contesti urbani (in termini di colore). Conseguentemente sono stati selezionati i colori che maggiormente caratterizzano il centro storico di Roma e pigmenti rossi, grigi e bianchi sono stati inclusi in una percentuale pari al 5% in peso. Per migliorare poi le proprietà termiche ed ottiche, è stata inclusa una pari quantità di un pigmento IR come l'Altiris Huntsman. Gli altri componenti inseriti sono infine aggregati di vetro fino, cemento Portland bianco ed acqua. La composizione dei prototipi è riportata in Tab. 2.21 mentre i campioni preparati, unitamente alla tipologia di marmo che sarà utilizzato in alcune configurazioni alternative del sito studiato, sono riportati in Fig. 2.37.

Tabella 2.21. Composizione in peso dei materiali prototipali.

Prototypes composition	weight %
White portland cement	37
Fine glass aggregates	41
Water	12
Traditional colored pigments	5
IR pigments	5

Figura 2.37. Materiali cool considerati nello studio: marmo bianco di Carrara (a), materiali IR di colore bianco (b), rosso (c) e grigio (d).



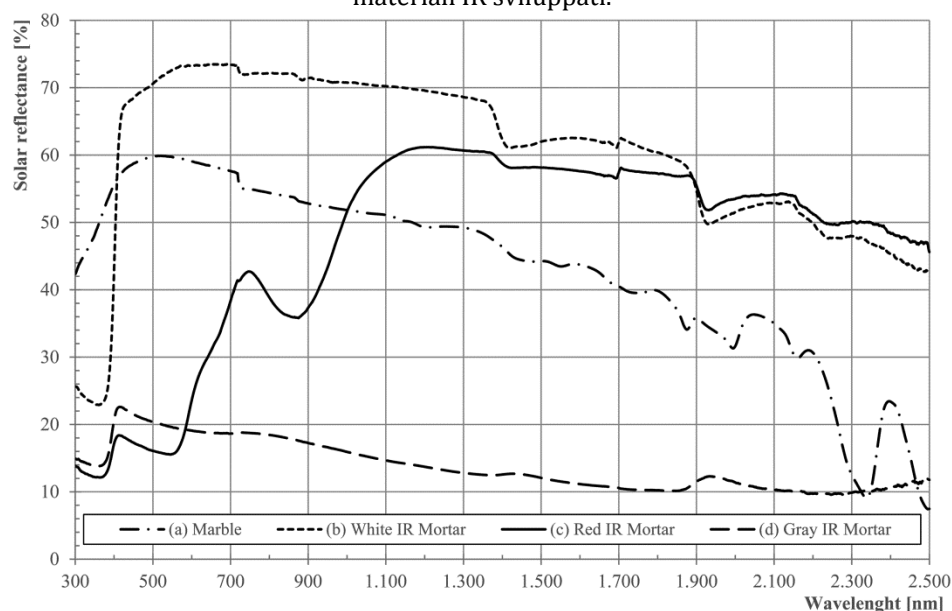
Va detto che i materiali sviluppati possono essere aggiustati direttamente in sito con riferimento al colore ed alla saturazione dello stesso. A tal fine risulta essere necessario agire solo sui pigmenti colorati e quelli afferenti alla tipologia IR. I vari materiali sono quindi stati combinati con riferimento ai limiti orizzontali (paving) e verticali (envelope) del sito, delineando una serie di casi (Tab. 2.22) che sono stati confrontati con la configurazione corrente del sito di Via delle Carrozze.

Tabella 2.22. Casi analizzati con riferimento al sito di Via delle Carrozze per testare l'influenza di materiali cool innovativi.

Combination #	Surface	Traditional mortar	Traditional stone paving	(a) Marble	(b) White	IR mortar (c) Red	(d) Gray
Case R (Reference)	Envelope	x					
	Paving		x				
Case 1	Envelope			x			
	Paving		x				
Case 2	Envelope			x			
	Paving						x
Case 3	Envelope					x	
	Paving		x				
Case 4	Envelope					x	
	Paving						x
Case 5	Envelope				x		
	Paving		x				
Case 6	Envelope				x		
	Paving						x
Case 7	Envelope					x	
	Paving			x			

Va inoltre precisato che i materiali individuati come cool sono stati preliminarmente analizzati in laboratorio per determinarne i valori delle caratteristiche termiche ed ottiche ed includere le stesse come parametri di input per il software ENVI-met, adoperato per le simulazioni numeriche. A tal fine è stato quindi usato uno spettrofotometro ed i risultati sono riportati in Fig. 2.38.

Figura 2.38. Valori misurati per il coefficiente di riflessione con riferimento al marmo bianco di Carrara ed ai materiali IR sviluppati.



Per quanto riguarda infine i valori delle altre proprietà misurate (Tab. 2.23), l'emissività è stata valutata attraverso un emissometro portatile mentre la conduttività termica attraverso un Hot Disk 2500S.

Tabella 2.23. Caratteristiche termiche ed ottiche dei materiali.

Material	Optic characteristics	Thermal characteristics	
	Solar reflectance	Emissivity	Conductivity [$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$]
(a) marble	0.59	0.83	2.28
(b) White IR mortar	0.66	0.90	1.00
(c) Red IR mortar	0.40	0.90	1.01
(d) Gray IR mortar	0.30	0.90	1.00

2.11.3. Simulazioni in ENVI-met e validazione dei risultati

Il passo successivo ha riguardato la costruzione del modello in ENVI-met. Tuttavia, prima di procedere alle simulazioni relative ai vari casi riportati in Tab. 2.22, è stata preliminarmente valutata la cell size in grado di condurre ai risultati più affidabili. Tale valutazione è stata effettuata tenendo conto anche dei tempi di simulazione.

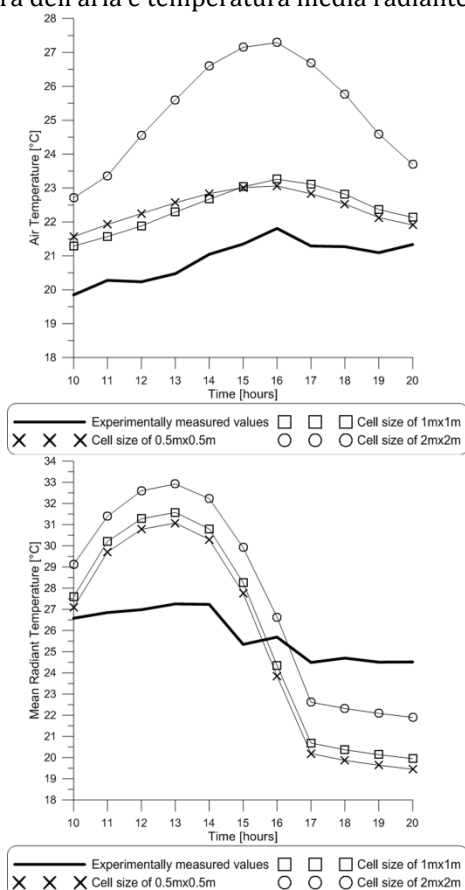
Per questa ragione, sono stati riprodotti tre differenti modelli del canyon urbano studiato.

Un primo modello è stato costruito adoperando una cell size di $0.5 \times 0.5 \text{ m}^2$ ed è quindi caratterizzato da un dominio orizzontale di 76×200 celle. Per il secondo modello è stata invece scelta una cell size di $1 \times 1 \text{ m}^2$ e ciò ha condotto ad un dominio orizzontale di 38×100 celle. Infine è stato implementato un ultimo modello con una cell size di $2 \times 2 \text{ m}^2$ ed un dominio orizzontale di 19×50 celle.

Per quanto riguarda invece la spaziatura verticale del dominio, è stata adoperata una griglia telescopica. Essa risulta avere una spaziatura di 0.5 m nei primi 3 m di quota, cioè per quelle altezze caratterizzanti le altezze alle quali le persone interagiscono. Al di sopra di tale valore interviene invece un fattore di estensione del 20%.

I risultati ottenuti in ciascuno dei tre casi sono stati poi confrontati con quelli sperimentalmente misurati sul campo. Vengono quindi riportati in Fig. 2.39 gli andamenti sperimentalmente misurati e simulati della temperatura dell'aria e della temperatura media radiante. La scelta di esaminare tali variabili è dovuta al fatto che esse sono quelle che influenzano maggiormente l'outdoor thermal comfort nell'area mediterranea.

Figura 2.39. Andamenti sperimentalmente misurati e simulati per temperatura dell'aria e temperatura media radiante.



In Tab. 2.24 vengono inoltre riportati i valori calcolati per il Mean Absolute Error (MAE):

Tabella 2.24. Mean Absolute Errors relativi a temperatura dell'aria e temperatura media radiante per le differenti cell sizes esaminate.

Cell size	T_A [°C]	T_{MR} [°C]
0.5x0.5m ²	1.51	3.39
1x1m ²	1.54	3.44
2x2m ²	4.36	3.47

Esaminando i valori riportati in Tab. 2.24, è possibile notare come i Mean Absolute Errors inferiori vengano registrati per il modello con la cell size di 0.5x0.5 m². Va però detto che le differenze tra i valori afferenti al modello con cell size 0.5x0.5 m² ed a quello con cell size 1x1m² non risultano essere significative. La differenza tra i Mean Absolute Errors dei due modelli più elevata viene infatti raggiunta per la temperatura media radiante e risulta essere pari a 0.05 °C. Le differenze aumentano

invece se ad essere considerato è il modello con cell size di 2x2 m², dove i minori tempi di calcolo comportano una minore accuratezza dei risultati predetti dal software. Conseguentemente è stato scelto di adoperare il modello intermedio, con una cell size di 1x1m².

Per esaminare più approfonditamente le abilità predittive del modello scelto, è stato poi operato un confronto con i risultati sperimentalmente misurati sulla base di parametri comunemente usati per analizzare gli output delle simulazioni [166]. Essi sono il coefficiente di determinazione (R^2), il Root Mean Square Error (RMSE) ed il Willmott's index of agreement (d). In Tab. 2.25 vengono quindi riportati i valori numerici ottenuti in questo studio e vengono confrontati, sempre con riferimento alla temperatura dell'aria ed a quella media radiante, con quelli ottenuti in altre ricerche.

Tabella 2.25. Valori del coefficiente di determinazione (R^2), del Root Mean Square Error (RMSE) e del Willmott's index of agreement (d) ottenuti nel presente studio e confronto con i valori ottenuti in altri studi.

Study	City	Variable	R^2 [-]	RMSE [°C]	d [-]
Acero and Herranz-Pascual [154]	Bilbao, Spain	T_A	0.96 ^A	-	-
		T_{MR}	0.71 ^A	-	-
Chen et al. [156]	Freiburg, Germany	T_{MR}	0.25	-	-
Conry et al. [167]	Chicago, USA	T_A^B	-	0.87	0.78
		T_A^C	-	1.56	0.53
Duarte et al. [124]	Sao Paulo, Brazil	T_A	-	1.61 ^D	0.85 ^D
Ghaffarianhoseini et al. [132]	Kuala Lumpur, Malaysia	T_A	0.96	-	-
Hedquist and Brazel [168]	Phoenix, USA	T_A	0.89	2.9	0.79
		T_A	0.87	1.39	-
Jänicke et al. [149]	Berlin, Germany	T_{MR}	0.95	7.98	-
		T_A	0.85	0.66	0.95
Lee et al. [123]	Freiburg, Germany	T_{MR}	0.86	5.49	0.95
Middel et al. [129]	Phoenix, USA	T_A	-	1.74	0.98
Müller et al. [127]	Oberhausen, Germany	T_A	0.97	-	-
Qaid and Ossen [152]	Putrajaya, Malaysia	T_A	0.69	1.82	0.60
Song and Park [144]	Changwon City, S. Korea	T_A	0.52 ^A	4.83 ^A	-
Taleghani et al. [153]	Netherlands	T_A	-	1.00 ^A	-
Wang and Zacharias [131]	Beijing, China	T_A	0.81	-	-
Wang et al. [137]	Toronto, Canada	T_A	0.69 ^A	-	-
		T_A	0.79	1.51	0.99
[present study]	Rome, Italy	T_A	0.79	1.51	0.99
		T_{MR}	0.90	3.64	0.97

^A Mean value

^B Initialization from WRF (Weather Research and Forecasting Model) output

^C Initialization from observations

^D 1.5 above the ground

Dall'analisi dei risultati è possibile notare come per la temperatura media radiante è stato calcolato un valore dell' R^2 di 0.90. Tale valore denota una forte correlazione tra i valori predetti e quelli sperimentalmente misurati e, se comparato con il valore medio (0.75) relativo a tutti gli altri studi riportati in Tab. 2.25, è possibile apprezzare un incremento di 0.15. Un risultato in linea con il valore medio (0.79) ottenuto negli altri studi è stato invece ottenuto per la temperatura dell'aria. Tali risultati trovano poi un riscontro anche nel Willmott's index of agreement (d): esso assume per la temperatura dell'aria e per la temperatura media radiante i valori di 0.99 e di 0.97 rispettivamente. Va però detto che in questo caso il confronto con gli altri studi può essere effettuato solo per la temperatura dell'aria e conduce ad un miglioramento di 0.19. Non è invece possibile effettuare tali valutazioni per la temperatura media radiante a causa del ridotto numero di studi che hanno valutato il suddetto indicatore per tale variabile. Se infine ad essere valutato è il Root Mean Square Error

(RMSE), viene riscontrata, prendendo sempre come riferimento il valore medio relativo agli altri studi, una diminuzione di 0.28 e di 2.13 per temperatura dell'aria e media radiante rispettivamente.

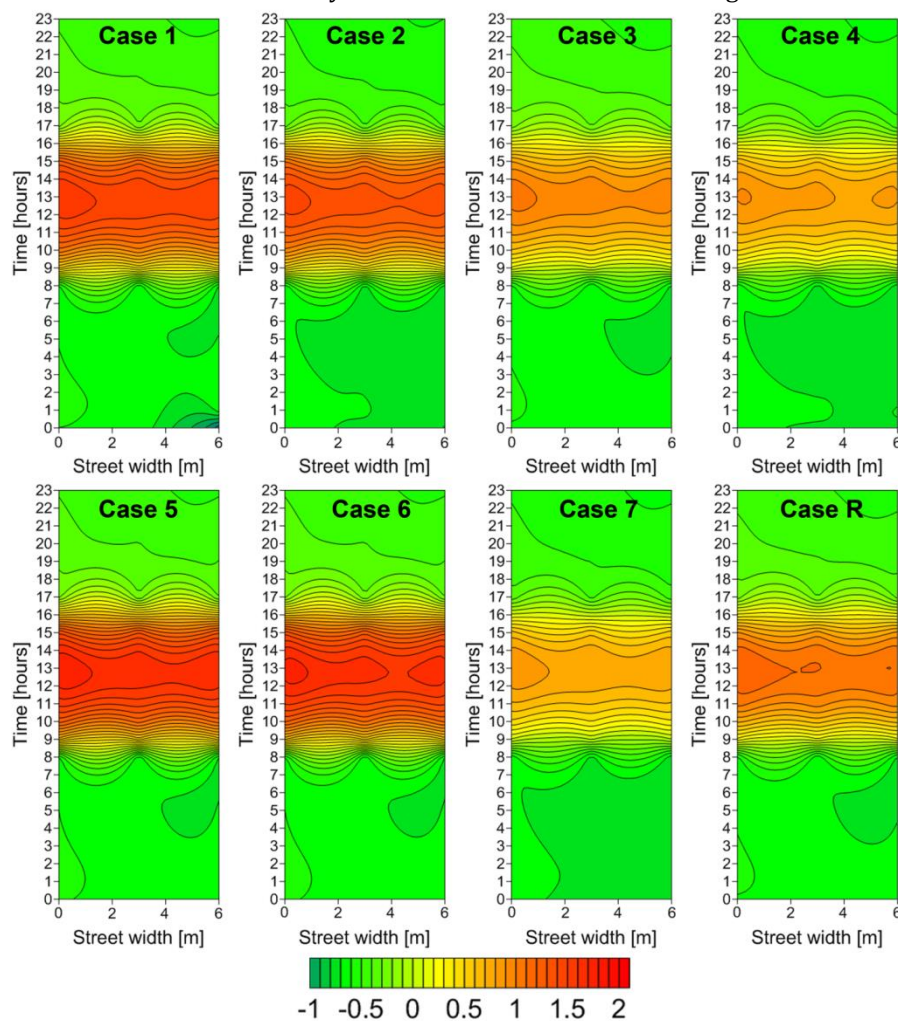
2.11.4. Outdoor thermal comfort

Una volta definite le impostazioni date ad ENVI-met e caratterizzati i materiali, il passo successivo ha riguardato la valutazione del loro impatto sul microclima e sull'outdoor thermal comfort del sito durante una tipica giornata estiva. Viene presa come riferimento la configurazione denominata "Case R", che rappresenta la situazione corrente e rispetto a questa vengono fatte considerazioni circa le altre.

Occorre inoltre precisare che lo studio viene fatto ipotizzando di avere un flusso di calore antropogenico costante; questa assunzione deriva dal fatto di voler esaminare esclusivamente le variazioni indotte dai materiali scelti.

Vengono quindi riportati in Fig. 2.40 i valori orari assunti dal Mediterranean Outdoor Comfort Index (MOCI) nella sezione di mezz'ora del canyon e ad un'altezza di 1.1 m sul livello del terreno, rappresentativa del centro di gravità del corpo umano per individui in piedi.

Figura 2.40. Valori orari assunti dal Mediterranean Outdoor Comfort Index (MOCI) con riferimento alla sezione di mezz'ora del canyon e ad un'altezza di 1.1 m on the ground level.



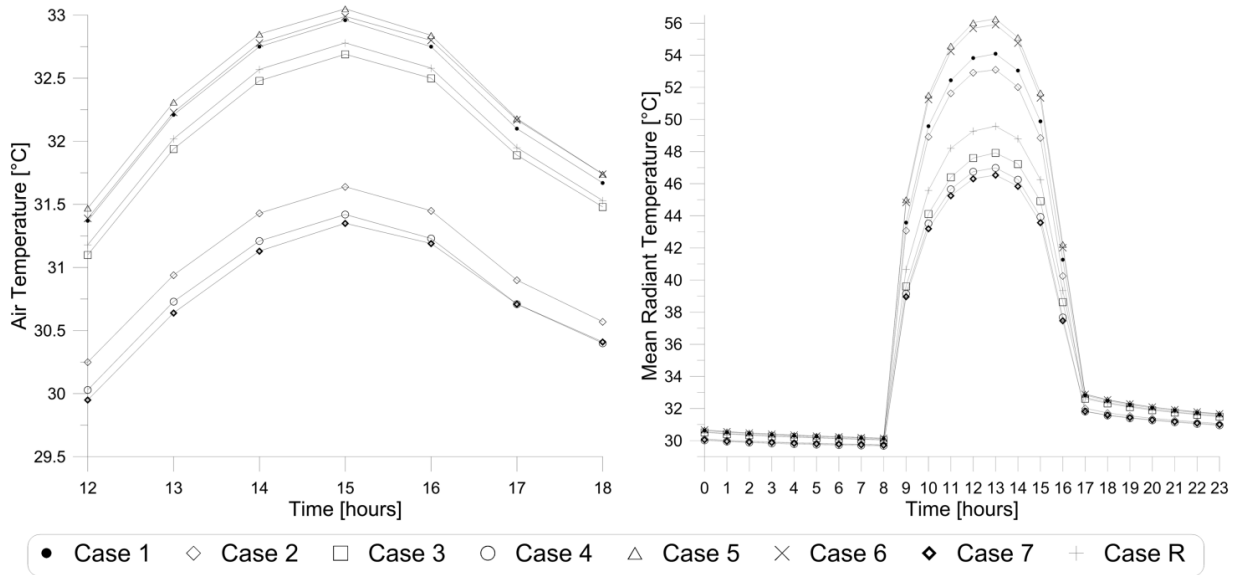
È possibile notare come la configurazione che conduce alle migliori condizioni microclimatiche sia quella denominata “Case 7”. Essa risulta caratterizzata da marmo per il piano di calpestio e da red IR mortar per le facciate degli edifici. Se comparata alla configurazione di riferimento “Case R”, è in grado di condurre ad un decremento del MOCI di circa 0.40 unità durante le ore più calde del giorno. Tale risultato può essere considerato una conseguenza del coefficiente d'albedo dei materiali usati per le superfici. In particolare la ground surface, caratterizzata nel “Case 7” dalla presenza di marmo, vede un coefficiente d'albedo di 0.59 e quindi 0.14 unità più alto di quello del traditional stone paving del “Case R”. In questo caso va detto che un aumento del coefficiente d'albedo è un vantaggio: la ground surface è caratterizzata da uno sky view factor che nelle zone centrali del canyon raggiunge valori di circa 0.40 e ciò permette di limitare la radiazione riflessa verso elementi costituenti l'arredo urbano.

La situazione inversa occorre per le facciate degli edifici prospicienti il canyon: in questo caso un aumento del coefficiente d'albedo, combinato con bassi valori dello sky view factor, darebbe luogo ad una serie di riflessioni multiple con un conseguente incremento della temperatura dell'aria e di quella media radiante. Deriva quindi da ciò il vantaggio di avere, per tali superfici e nel “Case 7”, un valore del coefficiente d'albedo inferiore di 0.05 unità rispetto a quello del “Case R”.

Le considerazioni fatte sopra trovano un ulteriore riscontro andando a valutare le altre due configurazioni che vedono un miglioramento del microclima rispetto al “Case R”. Esse sono il “Case 3” ed il “Case 4”. Sono entrambe caratterizzate dall'applicazione del red IR mortar per l'involucro mentre per il piano di calpestio sono stati usati rispettivamente traditional stone paving e gray IR mortar. Tenendo conto del fatto che lo stone paving ha un albedo di 0.20 ed il gray IR mortar di 0.30, emerge come durante le ore centrali del giorno l'implementazione del “Case 3” conduce ad un decremento del MOCI di 0.15 unità mentre il “Case 4” di circa 0.30.

Per quanto concerne invece le configurazioni comportanti le sollecitazioni termiche più gravose, queste risultano essere il “Case 5” ed il “Case 6”, con aumenti nel valore massimo del MOCI di 0.58 e 0.54 unità rispettivamente. In questo caso ad influenzare il computo relativo all'outdoor thermal comfort, non è però il materiale costituente il paving ma il marmo usato per l'envelope degli edifici. L'albedo di quest'ultimo, pari a 0.59, conduce infatti a delle inter-riflessioni multiple con un successivo incremento dei valori di variabili micrometeorologiche quali temperatura dell'aria e temperatura media radiante. In particolare il “Case 5” vede un incremento della temperatura dell'aria rispetto al “Case R” di circa 0.5 °C ma soprattutto un aumento della temperatura media radiante, sempre con riferimento alla configurazione corrente del sito, di circa 9 °C (Fig. 2.41).

Figura 2.41. Andamenti temporali di temperatura dell'aria e temperatura media radiante relativamente agli 8 casi esaminati.



L'influenza di tale variabile sul microclima e sulla percezione termica di individui afferenti all'area mediterranea, è testimoniata anche dal coefficiente 0.083 che figura nella relazione del MO-CI per la temperatura media radiante. Esso rappresenta l'inclinazione del MOCI rispetto alla suddetta variabile quando tutte le altre sono considerate costanti. Sempre con riferimento alla medesima relazione, è possibile notare come invece il coefficiente relativo alla temperatura dell'aria sia 0.058. L'influenza di queste due variabili, in particolare della temperatura media radiante, trova una conferma nei valori del test F parziale ottenuti a seguito di una field survey a Roma [26]. In quel caso infatti era stato ottenuto per la temperatura media radiante il valore di 82.4 e per la temperatura dell'aria il valore di 14.6. Per avere un immediato margine di paragone, l'umidità relativa aveva invece riportato un valore di 1.4.

Questi risultati trovano una conferma in quelli di altri studi [98][94] che hanno evidenziato come la temperatura media radiante è la variabile che influenza maggiormente il bilancio energetico del corpo umano. Occorre considerare che tali risultati sono una conseguenza del clima poco ventoso di Roma: infatti, in quei climi caratterizzati da valori elevati della velocità del vento, è la temperatura dell'aria a divenire la variabile dominante in quanto strettamente legata agli scambi termici convettivi [63].

Un peggioramento delle condizioni termoigrometriche viene infine riscontrato anche nei "Case 1" e "Case 2". In particolare, nel "Case 2" è possibile notare come l'utilizzo di marmo per l'involucro e di gray IR mortar per il piano di calpestio sia in grado di condurre a decrementi della temperatura dell'aria anche superiori ad 1 °C durante le ore centrali del giorno. Tuttavia, l'utilizzo di marmo per superfici caratterizzate da bassi valori dello sky view factor come i limiti verticali del sito porta ad aumenti della temperatura media radiante fino a 4 °C. In virtù delle considerazioni fatte in precedenza, è proprio questo il motivo per cui si assiste ad un aumento del MOCI di circa 0.35 unità. Va poi detto che nel "Case 1" tale incremento del MOCI risulta essere invece di circa 0.40 unità e questa

è una conseguenza dell'uso di traditional stone paving (con un albedo di 0.20) per la ground surface, a parità di materiale usato per i limiti verticali. L'albedo del gray IR mortar usato nel "Case 2" era invece 0.30.

Le considerazioni fatte sopra vengono poi riassunte in Tab. 2.26. Con riferimento alle ore più calde della giornata, vengono infatti riportate le variazioni, rispetto al "Case R", relative ai valori medi e massimi assunti dal MOCI in ogni configurazione.

Tabella 2.26. Variazioni relative ai valori medi e massimi riportati dal MOCI in ogni configurazione rispetto al "Case R", la configurazione corrente del sito.

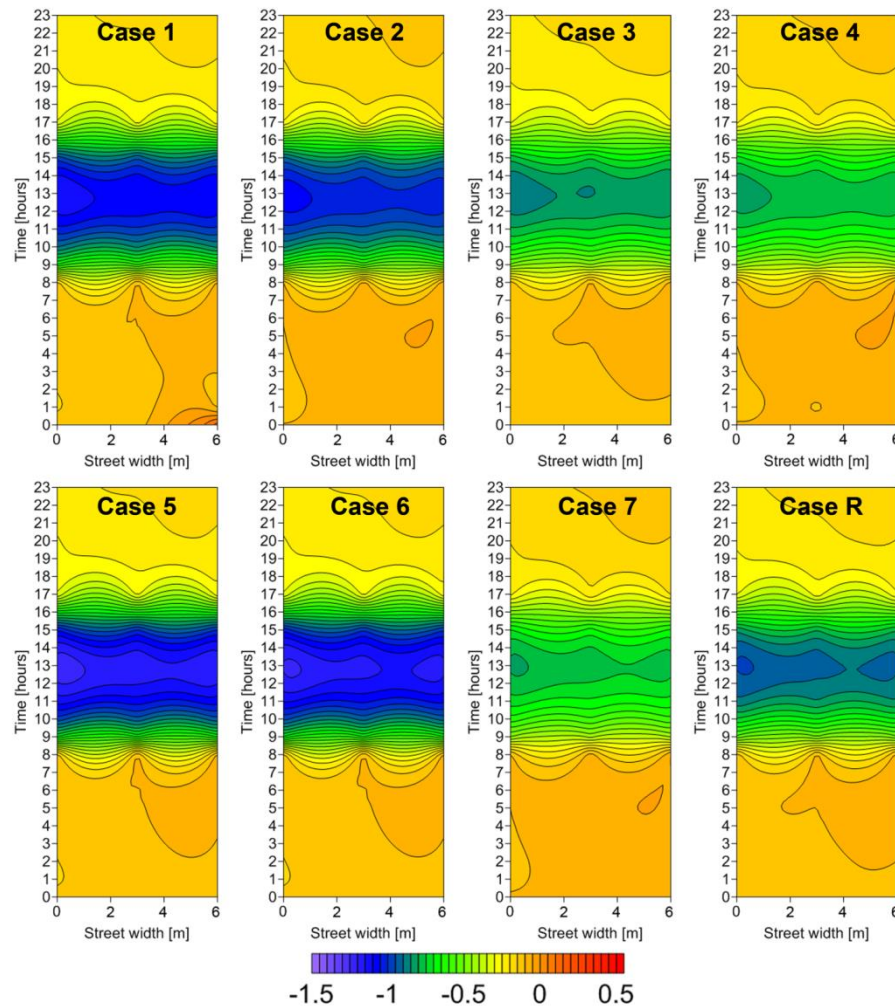
	Differenza tra i valori medi rispetto al Case R	Differenza tra i valori massimi rispetto al Case R
Case 1	0,22	0,39
Case 2	0,10	0,35
Case 3	-0,08	-0,15
Case 4	-0,18	-0,28
Case 5	0,30	0,58
Case 6	0,30	0,54
Case 7	-0,18	-0,39

Può poi essere interessante osservare cosa accade, in termini di outdoor thermal comfort, se le precedenti valutazioni dovessero essere fatte attraverso il Predicted Mean Vote (PMV)[47]. Esso è uno dei indici più usati in biometeorologia [13][158] ed il suo uso di quest'indice è infatti consigliato dall'ISO 7730 [45], dall'ASHRAE Standard 55-2010 [16] e dalle German engineering guidelines VDI 3787 [169], sviluppate appositamente nell'ambito di pianificazione territoriale urbana e regionale.

Come detto in precedenza, questo indice necessita di quattro variabili ambientali (temperatura dell'aria, temperatura media radiante, umidità relativa, velocità del vento) e di due variabili operative (tasso metabolico ed isolamento termico del vestiario) per essere determinato. L'unica differenza rispetto al calcolo del MOCI risiede quindi nell'impostazione di un dato valore per il tasso metabolico. Da questo punto di vista, tenendo conto che il sito studiato è un tipico canyon urbano, l'attività prevalente che le persone vi espletano è camminare. Conseguentemente è stato settato un valore di 115 W/m², che, in accordo con l'ASHRAE Standard 55-2010 [16], corrisponde ad un individuo che cammina a 3.2 km/h.

Vengono quindi riportate in Fig. 2.42 le differenze, prendendo come riferimento la sezione di mezzzeria del canyon ed un'altezza anche in questo caso di 1.1 m, tra i valori assunti dal MOCI ed i corrispondenti valori riscontrati per il PMV. Tale tipo di analisi è facilitata dal fatto che i due indici si basano sulla stessa 7-point scale.

Figura 2.42. Differenze tra i valori orari assunti dal Mediterranean Outdoor Comfort Index (MOCI) e quelli assunti dal Predicted Mean Vote (PMV) con riferimento alla sezione di mezz'ora del canyon e ad un'altezza di 1.1 m on the ground level.



È possibile in particolare osservare come le maggiori differenze negative tra MOCI e PMV vengano rilevate proprio per quelle configurazioni che causano le maggiori sollecitazioni termiche. Ciò significa chiaramente che queste sono, anche in base all'analisi del PMV, quelle caratterizzate dalle condizioni termoigrometriche peggiori. In altre parole, laddove sono stati riscontrati elevati valori del MOCI, vengono rilevati valori ancor più alti del PMV.

Ne consegue che anche in questo caso l'applicazione sui limiti verticali di materiali ad elevato albedo quali white IR mortar e marmo comporta un'influenza negativa sulla percezione termica delle persone, che diviene ancor più significativa nel momento in cui si utilizzano per il piano di calpestio materiali caratterizzati da un basso albedo. In base ai risultati ottenuti e riportati in Fig. 2.42, risulta quindi evidente il peggioramento del microclima occorrente nelle ore più calde della giornata per il "Case 1", "Case 2", "Case 5" e "Case 6".

Per giustificare questo aumento della sollecitazione termica, occorre precisare che originariamente il PMV era stato sviluppato per ambienti interni. Esso non computava quindi il contributo legato alla shortwave radiation ed assume condizioni stazionarie. Per risolvere la prima questione, si

è cercato di operare una parametrizzazione dei flussi radiativi [159] mentre, con riferimento alla seconda, è necessario precisare che le persone nei paesi industrializzati trascorrono mediamente meno del 10% del loro tempo all'esterno ed in maniera non continuativa [161]. Inoltre, a causa dei fenomeni naturali, vengono rilevate in ambiente esterno variazioni più ampie delle variabili micro-meteorologiche che influenzano la percezione termica delle persone. Per queste ragioni, tale indice tende a riportare, in corrispondenza di sollecitazioni non prossime alla neutralità termica come quelle causate da materiale ad elevato albedo per l'involucro, valori più elevati del MOCI.

Sempre con riferimento alle ore centrali della giornata, variazioni meno rilevanti tra un indice e l'altro sono state invece determinate per il "Case 3", il "Case 4" ed il "Case 7", cioè per quelle configurazioni caratterizzate da materiali che già in base al MOCI portano a sollecitazioni di minore entità. Un buon accordo è stato poi riscontrato per le ore notturne, del primo mattino e del tardo pomeriggio, cioè per quei contesti termici caratterizzati da valori inferiori di temperatura dell'aria e temperatura media radiante.

In questo caso la spiegazione risiede in fattori quali l'adattamento fisiologico alle condizioni climatiche locali (acclimatamento), l'adattamento comportamentale e sociale [44] ed elementi psicologici quali l'aspettativa. Il PMV è stato infatti creato sulla base di test effettuati prendendo come riferimento la popolazione nordeuropea, maggiormente abituata alle temperature caratterizzanti le ore più fresche del giorno piuttosto che a quelle più calde delle ore centrali.

A valle dell'analisi ne discende comunque la conferma del "Case 7" come configurazione più vantaggiosa. Vengono inoltre confermate le positive implicazioni derivanti dall'uso di materiali ad elevato albedo per superfici con un buon sky view factor e ad albedo controllato per le superfici verticali degli edifici.

2.12. Il caso del campus dell'Università degli Studi "Sapienza" di Roma

Gli eventi climatici estremi hanno una natura stocastica e quindi difficilmente prevedibile. Tuttavia negli ultimi anni si stanno manifestando con frequenza sempre maggiore a causa del surriscaldamento globale. Con riferimento agli ultimi 100 anni, l'incremento di temperatura nell'emisfero settentrionale è stato maggiore che negli ultimi 1000 e questo ha portato al manifestarsi di ondate di calore nel periodo che va da giugno ad agosto. Tutto questo comporta conseguenze sulle attività umane, con un forte coinvolgimento delle persone più esposte o più sensibili. Uno studio che pone in correlazione la mortalità tra la popolazione di ultra sessantacinquenni ed eventi climatici estremi è stata condotta a Roma analizzando i dati tra il 1992 ed il 2004, con il 2003 che è stato storicamente uno degli anni più caldi. Per relazionare i dati climatici alla percezione termica dell'organismo umano, tali studi utilizzano la Apparent Temperature [170], definita come (Eq. (31)):

$$T_{app} = -2.653 + 0.994 \cdot T_{air} + 0.0153 \cdot T_{dewpt}^2 \quad (31)$$

dove:

- T_{air} è la temperatura dell'aria [°C];
- T_{dewpt} è la dew point temperature [°C].

In Tab. 2.27 sono riportati i dati relativi alle temperatura minima e la temperatura massima apparente (calcolate con riferimento al 90th percentile) nel periodo 1992-2004.

Tabella 2.27. Dati climatici relativi alle ondate di calore nella città di Roma nel periodo 1992-2004.

Heat wave days		Minimum apparent temperature [°C] (90 th percentile)		Maximum apparent temperature [°C] (90 th percentile)	
All years*	2003	All years*	2003	All years*	2003
3-15	30	21.6	23.8	35.2	36.2

* except 2003

In Tab. 2.28 sono invece riportati i dati relativi alle morti naturali giornaliere durante le ondate di calore nel periodo 1992-2004 tra la popolazione di ultrasessantacinquenni.

Tabella 2.28. Effetti delle ondate di calore nella città di Roma nel periodo 1992-2004 sulla popolazione di ultra sessantacinquenni.

People aged 65+ years			Percentage increase		
Population	Mean daily natural deaths	All natural deaths	Respiratory deaths	Cardiovascular deaths	Cerebrovascular deaths
306,570	42	28.8%	66.9%	37.8%	48.0%

Va inoltre sottolineato come nelle città la popolazione è esposta a sollecitazioni termiche che vengono amplificate dalla presenza dell'isola di calore urbana. I problemi relativi al comfort ed alla salute della popolazione coinvolta sono quindi notevolmente più gravi rispetto a quelli di chi vive in zone rurali.

Esistono tre modi diversi di analizzare gli effetti di un'isola di calore urbana (UHI): Canopy Layer Heat Island (CLHI), Boundary Layer Heat Island (BLHI) e Surface Heat Island (SHI). Il CLHI è

lo strato d'aria più vicino alla superficie della città e si estende fino all'altezza media degli edifici presenti. E' lo strato i cui dati possono essere campionati grazie a stazioni microclimatiche per la misura a terra delle grandezze che regolano i fenomeni di una UHI. Lo studio che seguirà fa riferimento proprio a dati campionati nel CLHI, che hanno permesso di calibrare un modello atto alla simulazione di scenari urbani caratterizzati dalla presenza di diversi materiali di finitura sulle superfici cittadine.

In particolare, la crescita demografica di Roma ha portato alla formazione di un'isola di calore che nei giorni più caldi dell'anno conduce ad un incremento della temperatura dell'aria tra i 3.6 °C ed i 5 °C, prendendo come riferimento il centro cittadino e le zone più rurali che contornano la città.

2.12.1. Il sito studiato

La città universitaria dell'Università degli Studi di Roma "Sapienza" è stata analizzata per valutare gli effetti sul microclima urbano derivanti dalla sostituzione di parte dei materiali di finitura delle superfici orizzontali che costituiscono il tessuto cittadino ed dall'inserimento di urban greening. Il sito è un blocco di isolati situati nel quartiere di San Lorenzo, nel centro di Roma ed è costituita da 27 edifici che ospitano la maggior parte delle Facoltà dell'ateneo romano. E' stata inaugurata nel 1935 su disegno dell'architetto Marcello Piacentini ed è un esempio dell'architettura del periodo razionalista. Attualmente risulta essere il più grande ateneo d'Europa, con circa 145,000 studenti e oltre 10,000 dipendenti tra docenti e personale. Essa copre una superficie di circa 23 ettari (Figs. 2.43-2.44).

Figura 2.43. Localizzazione della Città universitaria dell'Università degli Studi di Roma "Sapienza".



Figura 2.44. Campus universitario nella sua configurazione attuale.



La città universitaria, nonostante i vari interventi di rinnovamento e trasformazione che si sono susseguiti nel tempo, ha conservato integra la sua chiara storicità architettonica. Le linee distintive dell'epoca della sua costruzione sono ancora oggi visibili. Gli edifici presenti sono infatti realizzati con materiali che variano dal travertino al quarzo tingeggiato con tonalità ocra. All'interno della città universitaria troviamo inoltre diverse configurazioni urbanistiche, che rendono interessante l'analisi microclimatica di tale sito. Tra queste vi sono ampie piazze caratterizzate dalla presenza di vegetazione o asfaltate, una piazza con uno specchio d'acqua ed una fontana, degli edifici affacciati gli uni sugli altri lungo strade secondarie che formano canyon urbani, una zona dotata di una fitta alberatura ad alto fusto (adibita a orto botanico) ed un'area di edifici molto vicini tra loro che confina con gli ambienti esterni in un tessuto discontinuo con spazi stretti e protetti dai venti.

2.12.2. Scenari proposti

Il campus dell'Università degli Studi Sapienza di Roma è quindi caratterizzato da un'ampia varietà di condizioni ambientali che differiscono per clima locale, caratteristiche topografiche e morfologia urbana. Può quindi essere considerato rappresentativo delle condizioni che possono essere trovate in una tipica città mediterranea.

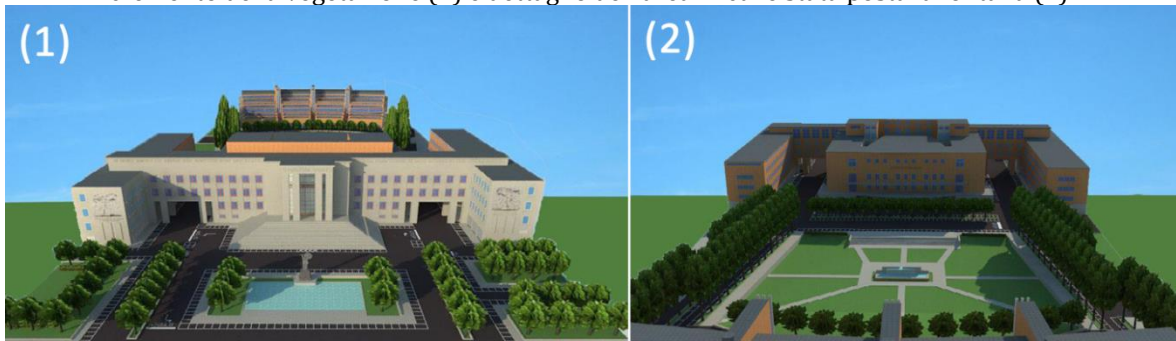
Per valutare gli effetti derivanti da differenti strategie di mitigazione, sono stati considerati sei differenti scenari:

- Case A: rappresenta la configurazione corrente del sito;
- Case B: è la configurazione che vede la sostituzione dell'asfalto con una pavimentazione [137] caratterizzata da un più alto albedo e da una minore capacità termica (Tab. 2.29);
- Case C: questa configurazione è caratterizzata da un albedo dei tetti di 0.66 [162], che è maggiore di 0.31 rispetto a quello della configurazione corrente;
- Case D: in questa configurazione viene aumentata la superficie coperta da vegetazione urbana di circa il 9% rispetto alla configurazione corrente (in Fig. 2.45-1) è possibile vedere l'intervento proposto nell'area davanti al Rettorato);

- Case E: questa configurazione è una combinazione delle tre precedenti strategie di mitigazione della Urban Heat Island (UHI) e vede l'implementazione di cool roofs, cool pavement e l'incremento della vegetazione urbana;
- Case F: nell'ultima configurazione esaminata non viene inserita nessuna strategia di mitigazione del microclima (viene rimossa anche la vegetazione) e viene ipotizzata la presenza esclusivamente di asfalto per la ground surface.

Nei casi D ed E, quale ulteriore intervento di mitigazione del microclima, è stata anche collocata una fontana (Fig. 2.45-2) al centro del giardino dietro al Rettorato.

Figura 2.45. Ricostruzione tridimensionale di alcuni degli interventi migliorativi proposti nei casi D ed E: incremento della vegetazione (1) e dettaglio dell'area in cui è stata posta la fontana (2).



In Tab. 2.29 vengono quindi riassunte le scelte progettuali fatte per ciascuno scenario:

Tabella 2.29. Dettaglio di alcuni input parameters.

	Pavement albedo [-]	Pavement volumetric heat capacity [J m ⁻³ K ⁻¹]	Pavement heat capacity per unit [J K ⁻¹]	Roof albedo [-]	Vegetation cover [%]
Case A	0.20	2.25	0.62	0.35	5.35
Case B	0.40	2.08	0.49	0.35	5.35
Case C	0.20	2.25	0.62	0.66	5.35
Case D	0.20	2.25	0.62	0.35	14.23
Case E	0.40	2.08	0.49	0.66	14.23
Case F	0.20	2.25	0.62	0.35	0.00

Meritano tuttavia di essere approfonditi gli aspetti legati alla vegetazione. In Tab. 2.29 sono stati infatti riportati i valori percentuali totali della superficie coperta da vegetazione. Può però essere interessante vedere in che misura le differenti piante vengono usate. Per tale ragione in Tab. 2.30 sono riportati i valori percentuali che rappresentano la superficie coperta da ogni singola specie vegetale e, allo stesso tempo, è possibile valutare i rispettivi valori di altezza, coefficiente di albedo e “Leaf Area Density” (LAD) [171]. Proprio per l'implementazione di quest'ultimo parametro, il software suddivide ogni pianta in dieci blocchi (rappresentativi quindi di differenti altezze) ed associa ad ognuno di questi un dato valore di (LAD) [171].

Tabella 2.30. Valori della “Leaf Area Density” (LAD), altezza, coefficiente di albedo e percentuale di superficie coperta da ciascuna pianta.

	Tree type 1	Tree type 2	Tree type 3	Grass	Shrub
LAD 1 [$z/z_p=0.1$]	0.075	0.110	0.150	0.300	0.100
LAD 2 [$z/z_p=0.2$]	0.075	0.140	0.150	0.300	0.150
LAD 3 [$z/z_p=0.3$]	0.075	0.180	0.150	0.300	0.300
LAD 4 [$z/z_p=0.4$]	0.075	0.270	0.150	0.300	0.400
LAD 5 [$z/z_p=0.5$]	0.250	0.330	0.650	0.300	0.650
LAD 6 [$z/z_p=0.6$]	1.150	0.370	2.150	0.300	0.700
LAD 7 [$z/z_p=0.7$]	1.060	0.360	2.180	0.300	0.850
LAD 8 [$z/z_p=0.8$]	1.050	0.330	2.050	0.300	0.750
LAD 9 [$z/z_p=0.9$]	0.920	0.250	1.720	0.300	0.550
LAD 10 [$z/z_p=1.0$]	0.000	0.000	0.000	0.300	0.150
z_p [m]	20.000	20.000	15.000	0.500	1.000
α_F [-]	0.200	0.200	0.200	0.200	0.200
Superficie coperta nei casi A, B, C [%]*	1.43	1.46	0.94	0.29	1.23
Superficie coperta nei casi D, E [%]*	2.19	2.43	8.27	0.53	0.82
Superficie coperta nel caso F [%]*	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

* Percentuale rispetto alla superficie totale del campus universitario.

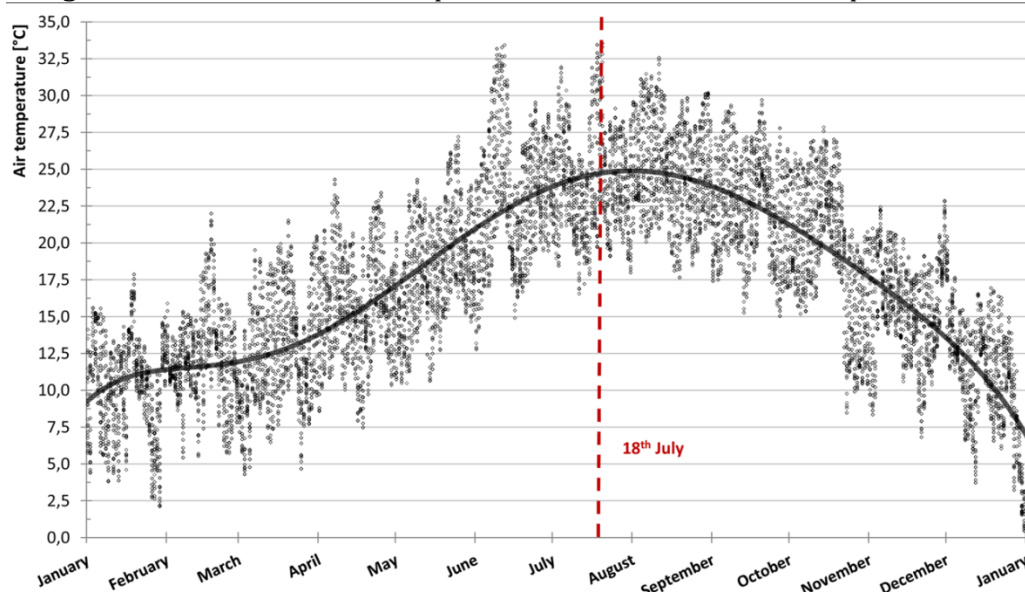
2.12.3. Settaggio per le simulazioni numeriche e validazione del modello

Per effettuare le simulazioni è stato quindi sviluppato un modello tridimensionale del campus universitario. Il dominio orizzontale consiste in una griglia di 55x70 celle mentre la dimensione verticale è stata determinata in accordo con una griglia telescopica avente un fattore di estensione pari al 20%. Ciò ha portato il limite superiore del dominio ad un'altezza di 152.32 m, molto superiore rispetto ai 35 m dell'edificio più alto. Sono stati quindi evitati problemi legati agli effetti di bordo ed a tale finalità ha contribuito anche l'inserimento di tre nesting grids (per un totale di 72 m); esse hanno aumentato infatti la distanza tra i limiti laterali del modello e l'area di interesse.

Per approfondire le impostazioni date come setup per le simulazioni numeriche, vanno poi discussi gli input parameters da inserire nel software. Essi includono le condizioni meteorologiche, l'umidità iniziale all'interno del terreno ed il rispettivo profilo di temperatura, le proprietà fisiche legate alle strutture urbane e, come detto in precedenza, le piante.

Alcuni parametri dipendono quindi dalla giornata scelta per effettuare lo studio. A tal proposito, occorre considerare che il sito esaminato in questa ricerca si trova a Roma, città tipicamente mediterranea ed appartenente alla categoria Csa della classificazione dei climi di Köppen-Geiger [24]. La temperatura media del mese più caldo risulta conseguentemente superiore a 22 °C ed è proprio durante la stagione estiva che si hanno le maggiori sollecitazioni termiche sugli individui. Per tale ragione, è stata considerata per effettuare il confronto tra le differenti strategie di mitigazione la giornata del 18 luglio 2014, tipica di un'ondata di calore (Fig. 2.46).

Figura 2.46. Andamento della temperature dell'aria all'interno del campus nel 2014.



La scelta del giorno per le simulazioni influenza gli input parameters per l'inizializzazione dati ad ENVI-met e riportati nelle categorie "Main data", "Settings for Soil" e "Clouds" di Tab. 2.31. Le "Building properties" derivano invece dalle scelte progettuali effettuate: la temperatura degli ambienti interni è stata impostata a 26 °C in accordo con la normativa ISO 6946 [172] mentre i valori delle trasmittanze termiche e dei coefficienti di albedo sono stati inseriti in accordo con i materiali costituenti gli edifici del sito. Va però detto che sono valori opportunamente mediati: questa versione del software non permette infatti di inserire valori differenti per ogni singolo edificio.

Tabella 2.31. Parametri impostati per le simulazioni in ENVI-met.

Main data	Starting time and day	06:00 am del 16 luglio 2014
	Durata della simulazione [hours]	72
	Wind speed in 10 m above ground [m/s]	5.79
	Wind direction [N=0 or 360, E=90, S=180, W=270]	225
	Roughness length Z_0 at reference point [m]	1
	Initial temperature atmosphere [K]	305
	Specific humidity in 2500 m [g water/kg air]	17
	Relative humidity in 2 m [%]	65
Building properties	Inside temperature [K]	293
	Heat transmission walls [W/m^2K]	1.25
	Heat transmission roofs [W/m^2K]	1.54
	Albedo walls [-]	0.30
	Albedo roofs [-]	0.35/0.66*
Settings for soil	Initial temperature upper layer (0-20 cm) [K]	291
	Initial temperature middle layer (20-50 cm) [K]	290.65
	Initial temperature deep layer (below 50 cm) [K]	290
	Relative humidity upper layer (0-20 cm) [%]	50
	Relative humidity middle layer (20-50 cm) [%]	60
	Relative humidity deep layer (below 50 cm) [%]	60
Clouds	Fraction of low clouds [x/8]	0
	Fraction of medium clouds [x/8]	0
	Fraction of high clouds [x/8]	0

* Questo valore dipende dalle scelte fatte in ogni specifica configurazione

Alcune delle scelte fatte circa i dati riportati in Tab. 2.31 meritano di essere discusse.

Per esempio è stato scelto di iniziare la simulazione alle ore 06:00 am per consentire al modello di seguire i processi atmosferici ed il progressivo aumento della radiazione solare. Inoltre è stata impostata una durata della simulazione pari a 72 ore: il software necessita chiaramente di un tempo di inizializzazione e, mediante tale scelta, vengono considerati validi solo i risultati relativi alle ultime 24 ore. Per far sì che tali risultati siano rappresentativi del giorno 18 luglio 2014, la simulazione ha quindi avuto inizio il giorno 16 luglio 2014.

Per validare le prestazioni del software ENVI-met, i risultati della simulazione effettuata per il giorno 18 luglio 2014 e con riferimento al Case A (configurazione corrente del sito) sono stati comparati a valori sperimentalmente misurati. Per tale ragione sono state adoperate due centraline microclimatiche portatili e ad esse è stato connesso una termoresistenza al platino PT 100 per misurare la temperatura dell'aria (campo di misura: $(-25) \div (+85)$ °C; risoluzione: 0.1 °C; accuratezza: ± 0.5 °C al di sopra di -7 °C) ed un globotermometro per misurare la temperatura media radiante (campo di misura: $(-40) \div (+80)$ °C; risoluzione: 0.1 °C; accuratezza: ≤ 0.1 °C a 0 °C).

Le misure sperimentali sono state effettuate ad un'altezza di 1.1 m (la stessa considerata per valutare gli output di ENVI-met) e tre differenti punti di misura sono stati considerati. Essi rappresentano situazioni urbane diverse: 1) un ampio parcheggio asfaltato; 2) un canyon urbano; 3) una zona con verde. Una delle due centraline microclimatiche è stata collocata nel punto 1, in posizione centrale rispetto al sito, ed i dati sono stati misurati continuamente durante il giorno esaminato. Con la seconda centralina, sono state invece effettuate misure nei punti 2 e 3: a differenza delle altre, queste misure non hanno avuto carattere continuativo e sono state di natura puntuale. Prima di effettuare la misura, è stato inoltre sempre atteso un tempo pari al tempo di risposta dello strumento per tenere conto della sua inerzia termica. La Fig. 2.47 riporta quindi, per i tre punti, il confronto tra i valori sperimentalmente misurati e quelli forniti da ENVI-met. Le variabili micrometeorologiche considerate sono la temperatura dell'aria e la temperatura media radiante perché sono i fattori che influenzano maggiormente l'outdoor thermal comfort nell'area mediterranea [120].

Oltre che graficamente, il confronto tra i valori sperimentalmente misurati e quelli forniti come output da ENVI-met è stato effettuato anche tramite dei parametri comunemente adoperati per valutare le prestazioni dei modelli [123]: il coefficiente di determinazione (R^2), il Root Mean Square Error (RMSE) ed il Willmott's index of agreement (d). Per tale ragione in Tab. 2.32 vengono riportati i valori medi di questi parametri ottenuti considerando i tre punti di misura. Per effettuare un confronto, sono stati inoltre riportati i valori ottenuti in studi effettuati in altre città.

Figura 2.47. Valori di temperatura dell'aria e temperatura media radiante misurati sperimentalmente e forniti da ENVI-met.

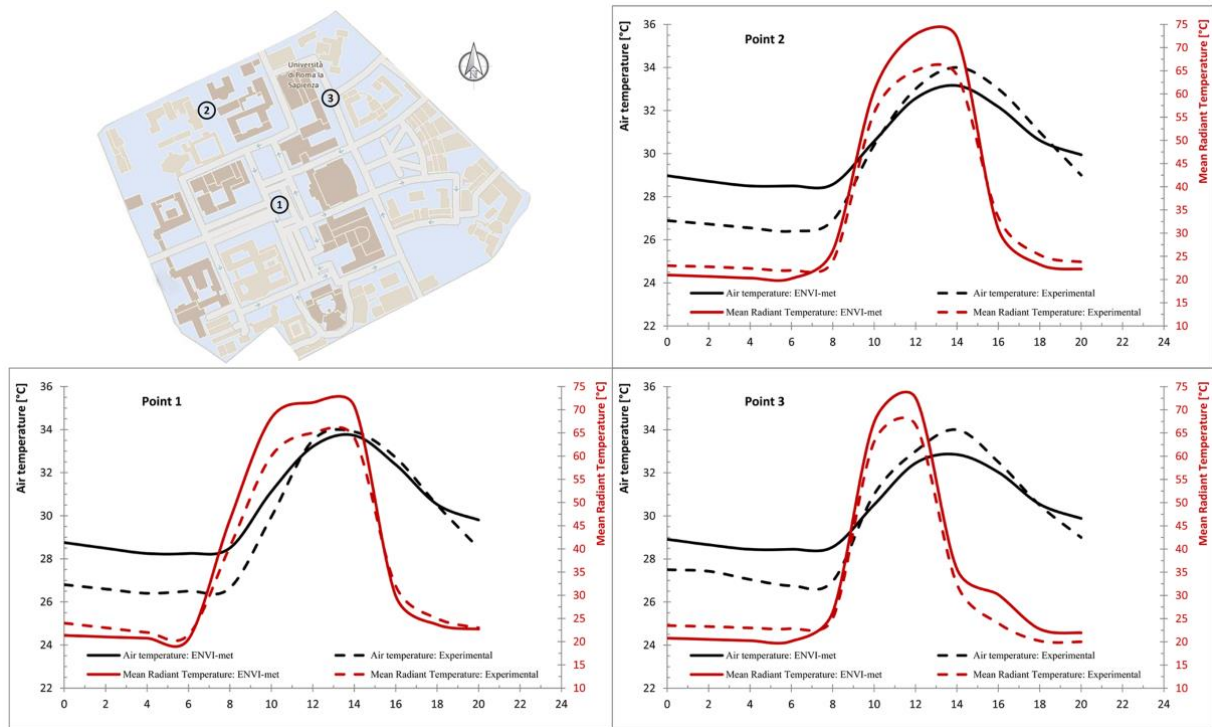


Tabella 2.32. Risultati della validazione sperimentale e confronti con i valori ottenuti in altri studi.

Study	City	Variable	R ² [-]	RMSE [°C]	d [-]
Acero and Herranz-Pascual [154]	Bilbao, Spain	T _A	0.96 ^A	-	-
		T _{MR}	0.71 ^A	-	-
Chen et al. [173]	Freiburg, Germany	T _{MR}	0.25	-	-
Conry et al. [167]	Chicago, USA	T _A ^B	-	0.87	0.78
		T _A ^C	-	1.56	0.53
Duarte et al. [124]	Sao Paulo, Brazil	T _A	-	1.61 ^D	0.85 ^D
Ghaffarianhoseini et al. [132]	Kuala Lumpur, Malaysia	T _A	0.96	-	-
Hedquist and Brazel [168]	Phoenix, USA	T _A	0.89	2.9	0.79
		T _A	0.87	1.39	-
Jänicke et al. [149]	Berlin, Germany	T _{MR}	0.95	7.98	-
		T _A	0.85	0.66	0.95
Lee et al. [123]	Freiburg, Germany	T _{MR}	0.86	5.49	0.95
Middel et al. [129]	Phoenix, USA	T _A	-	1.74	0.98
Müller et al. [127]	Oberhausen, Germany	T _A	0.97	-	-
Qaid and Ossen [152]	Putrajaya, Malaysia	T _A	0.69	1.82	0.60
		T _A	0.88	1.89	0.91
Salata et al. [8]	Rome, Italy	T _{MR}	0.96	2.79	0.87
		T _A	0.52 ^A	4.83 ^A	-
Song and Park [144]	Changwon City, S. Korea	T _A	-	1.00 ^A	-
Taleghani et al. [153]	Netherlands	T _A	-	-	-
Wang and Zacharias [131]	Beijing, China	T _A	0.81	-	-
Wang et al. [137]	Toronto, Canada	T _A	0.69 ^A	-	-
		T _A	0.97	1.30	0.92
Salata et al. [present study]	Rome, Italy	T _{MR}	0.98	3.86	0.98

^A Mean value

^B Initialization from WRF (Weather Research and Forecasting Model) output

^C Initialization from observations

^D 1.5 above the ground

È possibile notare come i risultati ottenuti nel processo di validazione siano soddisfacenti. Se il numero di occorrenze è considerato, un vero e proprio confronto è possibile in primo luogo per la temperatura dell'aria. In questo caso è stato ottenuto per l' R^2 un valore di 0.97: esso è 0.14 unità più alto di quello ottenuto facendo la media tra i valori derivanti da tutti gli altri studi. Un buon risultato viene apprezzato anche per il Willmott's index of agreement (d) e per il Root Mean Square Error (RMSE): in questo caso sono stati infatti rilevati i valori di 0.92 ed 1.30 rispettivamente, migliori dei valori di 0.80 e di 1.68 ottenuti considerando tutti gli altri studi in Tab. 9. Da questo punto di vista occorre considerare che i risultati di una simulazione sono affidabili se questi parametri tendono a: $R^2 \rightarrow 1$, $RMSEs \rightarrow 0$ and $d \rightarrow 1$. Conseguentemente è possibile dire che risultati soddisfacenti sono stati ottenuti anche per la temperatura media radiante. In particolare è stato riscontrato un decremento nel Root Mean Square Error di 1.56 °C rispetto al valore medio calcolato rispetto agli altri studi.

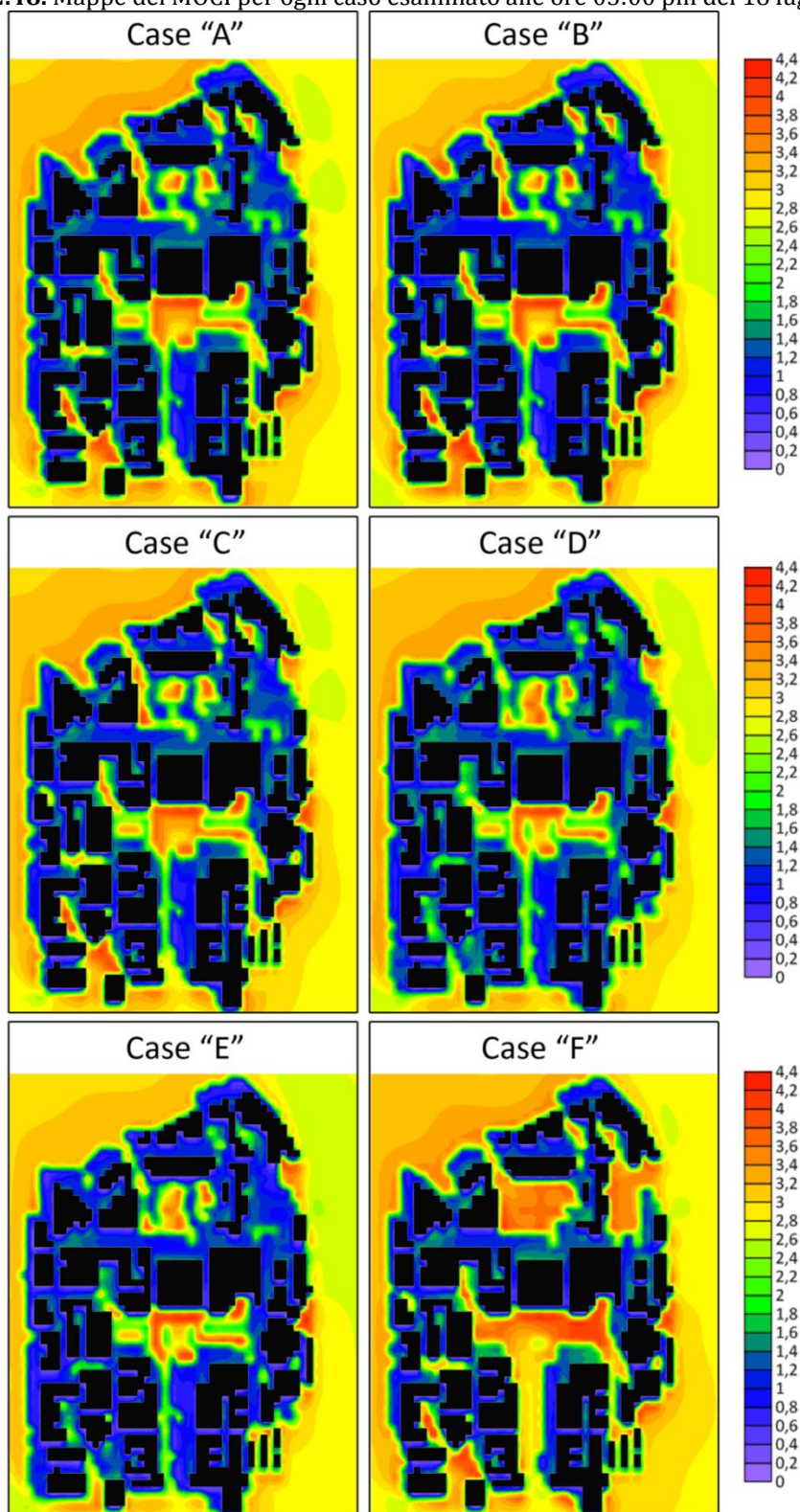
2.12.4. Risultati e discussioni

Data l'importanza dello studio del microclima urbano, risulta fondamentale identificare potenziali azioni che possano mitigare gli effetti della Urban Heat Island (UHI). Da questo punto di vista, caratteristiche urbanistiche differenti possono determinare un'elevata variabilità delle condizioni termiche all'interno della stessa città e, per valutare la loro influenza, lo studio viene effettuato ipotizzando di avere un flusso di calore antropogenico costante. Esso è una sorgente aggiuntiva di calore che deriva dalle attività umane e dai consumi energetici che esse comportano: traffico, condizionamento, combustione industriale, produzione e consumo di energia elettrica. Vengono quindi riportate in Fig. 2.48 le mappe del MOCI per l'orario più caldo (le ore 03:00 pm del 18 luglio 2014) e per ciascun caso.

Prendendo come riferimento il Case A (configurazione corrente del sito), ciò che risulta è un miglioramento delle condizioni termoigrometriche nei casi D ed E e, come era lecito aspettarsi, un marcato peggioramento nel caso F. L'implementazione del cool pavement (Case B) comporta invece un lieve incremento solo dei valori massimi assunti dal MOCI mentre variazioni apprezzabili non sono state riscontrate nel Case C.

In quest'ultimo caso (caratterizzato dall'implementazione di cool roofs), una possibile spiegazione può essere trovata nella distanza tra le porzioni sommitali delle costruzioni e la quota alla quale gli esseri umani interagiscono. L'altezza degli edifici che caratterizzano il campus universitario è infatti generalmente superiore ai 15 m (in alcuni casi raggiunge i 25 m) e ciò limita l'influenza dell'aumento dell'albedo dei tetti sul MOCI, calcolato ad 1.1 m sul livello del terreno. Una situazione simile era stata riscontrata da Wang et al. [137] per la città di Toronto (Canada). Anche in questo caso erano state comparate differenti strategie di mitigazione del microclima e l'influenza dei cool roofs risultava più alta in una detached house area piuttosto che in una high-rise area.

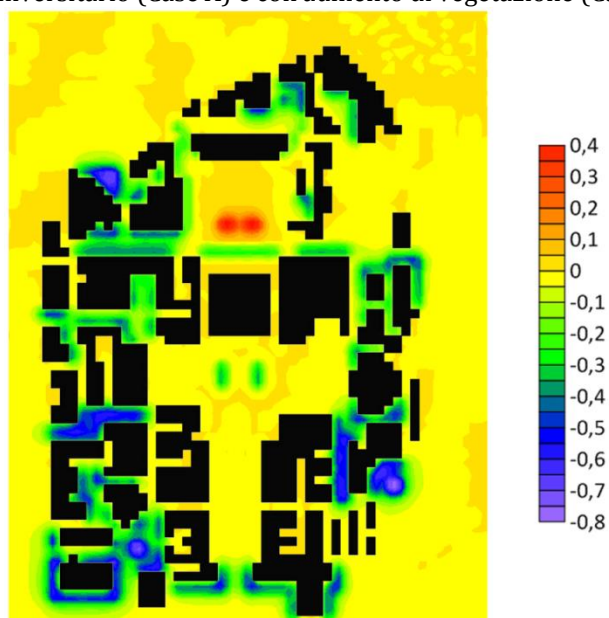
Figura 2.48. Mappe del MOCI per ogni caso esaminato alle ore 03:00 pm del 18 luglio 2014.



Per quanto riguarda invece l'influenza del cool pavement, il Case B mostra come il MOCI aumenti in corrispondenza di quelle aree caratterizzate da elevati valori dell'indice. Queste aree sono quelle soggette a direct shortwave radiation e, come evidenziato in uno studio effettuato a Roma [107], in queste condizioni un aumento del coefficiente di albedo comporta un aumento della temperatura media radiante e conseguentemente un peggioramento della qualità termica dell'ambiente. L'applicazione di cool pavement conduce invece ad un decremento del MOCI per le restanti aree: in questo caso sembra infatti pesare la minore capacità termica del materiale, che comporta un minore accumulo di calore nella ground surface.

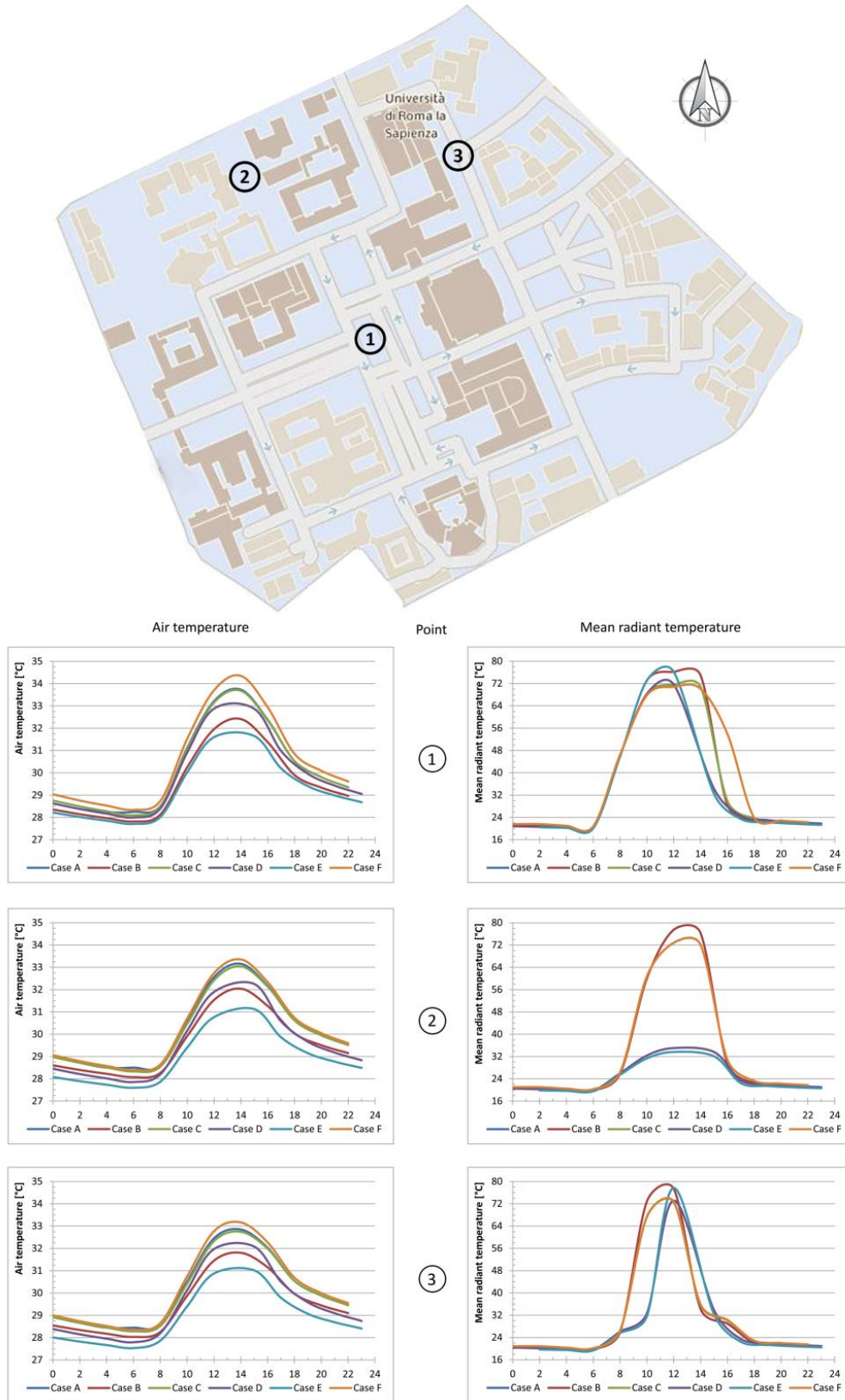
La stessa situazione si verifica nel Case E, dove vengono implementate allo stesso tempo le tre strategie di mitigazione esaminate. In questa configurazione infatti la minore capacità termica della ground surface si combina con la vegetazione. Essa diminuisce ulteriormente lo sky view factor (Fig. 2.49) di buona parte delle superfici e conseguentemente la loro possibilità di essere interessate da direct shortwave radiation.

Figura 2.49. Differenza tra i valori dello sky view factor nella configurazione corrente del campus universitario (Case A) e con aumento di vegetazione (Cases D ed E).



Questa configurazione risulta quindi quella caratterizzata da minore thermal stress. In Fig. 2.50 è possibile notare come per tre differenti punti (il punto 1 è all'interno di un ampio parcheggio mentre i punti 2 e 3 in canyon urbani) il Case E assicuri temperature dell'aria costantemente più basse rispetto alle altre configurazioni. L'andamento della temperatura media radiante conferma invece le considerazioni fatte in precedenza. L'aumento del coefficiente di albedo derivante dall'impiego del cool pavement porta il Case E ad avere valori di tale variabile prossimi a quelli del Case B in presenza di radiazione solare. Occorre però evidenziare come la diminuzione dello sky view factor correlata all'aumento di vegetazione diminuisca (o addirittura annulli nel caso del punto 2) il numero di ore con presenza di radiazione solare.

Figura 2.50. Trend simulato per 3 punti e per ciascun caso di temperatura dell'aria e temperatura media radiante durante il 18 luglio 2014.



Anche se l'assenza del cool pavement comporta temperature dell'aria leggermente più alte, l'analisi fatta per il Case E sulla temperatura media radiante può poi essere parzialmente estesa al Case D (caratterizzato solo da un aumento della vegetazione urbana). Da questo punto di vista, occorre considerare che i cespugli, la cui altezza è limitata, funzionano principalmente come elementi che impediscono alla radiazione riflessa di raggiungere le persone. Differentemente, gli alberi funzionano come elementi in grado di schermare la radiazione solare e di limitare il suo contributo sia sul bilancio termico dei pedoni che su quello delle superfici. Questo porta chiaramente ad una diminuzione della temperatura media radiante. L'aumento di aree verdi e vegetazione influenza quindi il bilancio radiativo e, in particolare, il flusso di calore immagazzinato. In accordo con Stewart ed Oke [87], la frazione di spazi verdi λ_v interviene infatti nel calcolo di tale contributo attraverso le Eqs. (32-33):

$$\text{di giorno: } \Delta Q_S = (0.20 \cdot \lambda_v + 0.33 \cdot \lambda_p) \cdot Q^* + 3 \cdot \lambda_v + 24 \cdot \lambda_p \quad (32)$$

$$\text{di notte: } \Delta Q_S = (0.54 \cdot \lambda_v + 0.90 \cdot \lambda_p) \cdot Q^* \quad (33)$$

dove λ_p è la frazione di aree edificate.

Un altro effetto strettamente correlato alla vegetazione è quello evapotraspirativo che conduce ad un decremento della temperatura dell'aria e ad un conseguente basso surriscaldamento: le specie vegetali possono infatti assorbire circa l'80% della radiazione incidente usandone più della metà per attivare i fenomeni traspirativi. Ciò porta quindi in diverse aree del campus universitario ad una diminuzione del rapporto di Bowen, definito come il rapporto tra il flusso di calore sensibile ed il flusso di calore latente. Sebbene esso sia molto variabile ed influenzato dalle precipitazioni, nelle aree urbane è molto più alto che in quelle rurali. Per avere un'idea, un valore tipico del rapporto di Bowen per terreni erbosi è 0.5 [87] mentre assume i valori di $1.2 \div 2$, ~ 4.4 e ~ 9.8 per aree residenziali, aree industriali e centro città rispettivamente.

Proprio nei valori più elevati del rapporto di Bowen può essere trovato uno dei fattori che portano il Case F ad essere la configurazione con i maggiori stress termici. In questa configurazione era stato infatti usato esclusivamente asfalto per la ground surface ed erano stati rimossi prato e vegetazione. L'impermeabilità delle superfici ha quindi ridotto l'umidità nel suolo disponibile per l'evaporazione (a svantaggio del flusso di calore latente). Le scelte progettuali fatte in questo caso hanno anche ripercussioni sul flusso di calore immagazzinato: esso aumenta a seguito dell'incremento del termine λ_p nelle Eqs. (32-33). Un ulteriore svantaggio risiede poi in un aumento dell'ammittenza termica, che può essere considerata una misura della risposta di una superficie ad un dato flusso di calore. Essa è chiaramente influenzata dalla capacità termica e l'asfalto usato in questa configurazione ha un valore di tale parametro di circa il 27% maggiore rispetto al concrete usato nei Cases B ed E. Baklanov et al. [174] hanno ad esempio messo in luce come il valore medio dell'ammittenza termica nelle città sia mediamente superiore rispetto a quelle delle zone rurali ($1,800$ e $1,500 \text{ Jm}^{-2}\text{s}^{-1/2}\text{K}^{-1}$ rispettivamente).

Le considerazioni fatte trovano una conferma nei risultati di Tab. 2.33, dove le differenti configurazioni vengono confrontate da un punto di vista quantitativo.

Tabella 2.33. Variazione media e massima rispetto al Case A (configurazione corrente del sito) di temperatura dell'aria, temperatura media radiante e MOCI.

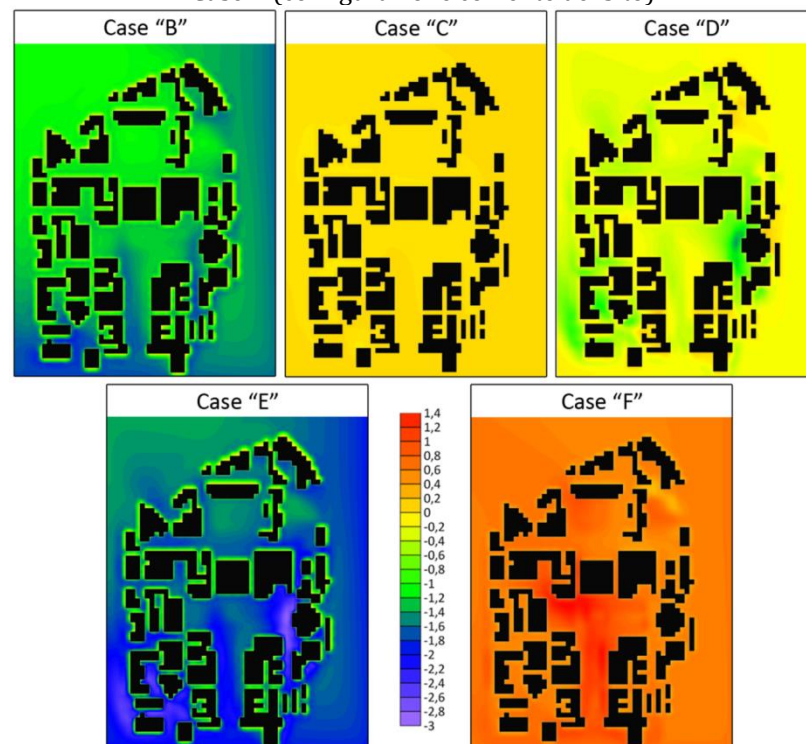
	Variazione media			Variazione massima		
	T _A [°C]	T _{MR} [°C]	MOCI [-]	T _A [°C]	T _{MR} [°C]	MOCI [-]
Case B	-1.12	-0.54	-0.07	-1.49	-2.39	-0.25
Case C	-0.03	-0.02	-0.01	-0.10	-0.13	-0.02
Case D	-0.32	-2.04	-0.14	-1.34	-37.33	-3.21
Case E	-1.49	-2.86	-0.24	-2.51	-38.41	-3.37
Case F	0.43	2.37	0.19	1.26	39.27	3.05

Essa conferma come il Case E sia quello più vantaggioso con un decremento medio e massimo del MOCI rispettivamente di -0.24 e -3.37. E' poi interessante notare come il cool pavement (Case B) comporti una maggiore diminuzione della temperatura dell'aria rispetto alla configurazione caratterizzata solamente da un aumento della vegetazione (Case D) ma come il Case D conduca a valori inferiori del MOCI grazie a valori minori di temperatura media radiante.

Nell'introduzione era stato fatto riferimento anche alla Apparent Temperature ed era stato evidenziato un aumento del tasso di mortalità a seguito di incrementi di tale indice. Come riportato in Tab. 2.27 con riferimento al 90th percentile, durante ondate di calore intense vengono registrati infatti aumenti della Apparent Temperature minima e massima di 2.2 ed 1 °C rispettivamente. È necessario quindi esaminare se le strategie di mitigazione valutate in questa ricerca sono in grado di limitare questi incrementi ed in che misura.

Per tale ragione, la Fig. 2.51 riporta la differenza tra la Apparent Temperature calcolata per ciascun caso e quella calcolata per la configurazione corrente del sito (Case A). Chiaramente viene preso in esame lo stesso orario scelto per la valutazione del MOCI: le ore 03:00 pm del 18 luglio 2014.

Figura 2.51. Differenza tra i valori della Apparent Temperature calcolati per ciascun caso e quelli calcolati per il Case A (configurazione corrente del sito).



Ciò che appare subito evidente è come la configurazione con i cool roofs (Case C) non dia luogo a variazioni apprezzabili di tale indice, confermando quanto ottenuto processando i risultati del MOCI. Le variazioni di temperatura dell'aria ed umidità relativa (le due variabili micrometeorologiche che intervengono nella relazione dell'Apparent Temperature) derivanti da un aumento dell'albedo dei tetti sono infatti estremamente piccole e non sono tali da causare una variazione significativa di questi indici al livello dei pedoni. La diminuzione media dell'Apparent Temperature all'altezza di 1.5 m risulta infatti di soli 0.03 °C.

Viene chiaramente confermato il forte peggioramento dell'ambiente termico correlato all'implementazione del Case F. In questo caso l'uso di solo asfalto per la ground surface e l'assenza di vegetazione conducono ad incrementi di tale indice superiori ad 1.5 °C nelle zone aperte ed interessate da shortwave radiation.

La situazione è invece differente per le restanti tre configurazioni. L'aumento della vegetazione urbana (Case D) comporta infatti un decremento dell'Apparent Temperature: questo decremento è tuttavia limitato se paragonato all'influenza che tale soluzione ha sul MOCI. Ciò è una conseguenza dell'aumento nell'umidità relativa derivante dai fenomeni evapotraspirativi: le minori temperature dell'aria solo parzialmente riescono a compensare tale incremento. Non bisogna inoltre dimenticare che, diversamente da quanto accade per il MOCI, nella relazione di questo indice non compare la temperatura media radiante (la variabile che influenza maggiormente la percezione termica degli individui nell'area mediterranea [26]). Pertanto non possono essere valutati compiutamente da tale indice i benefici legati ad un aumento della vegetazione. Le piante, come detto in precedenza, esercitano un'azione schermante nei confronti della radiazione solare e proprio in una diminuzione della temperatura media radiante risiede uno dei maggiori vantaggi. Nonostante ciò in alcuni punti il decremento dell'Apparent Temperature è stato stimato in 1.5 °C.

Un ulteriore miglioramento viene apprezzato nel Case B, che vede la presenza di cool pavements.

Dall'analisi del MOCI era emerso un peggioramento delle condizioni ambientali in quelle zone dove la combinazione di un più elevato ground albedo e della radiazione solare portava ad incrementi della temperatura media radiante. Questo fatto non interviene però nell'analisi dell'Apparent Temperature, i cui valori sono influenzati dalla minore temperatura dell'aria rilevata in questa configurazione. Ciò porta quindi a decrementi dell'Apparent Temperature mediamente superiori ad 1 °C (in alcune aree il decremento è anche di 1.9 °C).

Il Case E (rappresentativo di una combinazione tra i Cases B, C, D) conferma infine le sue maggiori potenzialità mitigative. Data però la scarsa influenza dei cool roofs, il miglioramento delle condizioni termoigrometriche occorre con il cool pavement in concrete e con l'aumento della vegetazione urbana. In media l'Apparent Temperature diminuisce in questa configurazione di circa 2 °C ma con decrementi massimi di circa 3 °C. Con riferimento all'area mediterranea, è possibile quindi sottolineare come interventi relativamente semplici (cool pavement e vegetazione urbana) siano in grado di limitare gli aumenti dell'Apparent Temperature derivanti da ondate di calore (stimati in poco più di 2 °C nel caso del 2003 ad esempio) e di conseguenza i tassi di mortalità delle persone più esposte.

3. SULLA CORRELAZIONE TRA OUTDOOR THERMAL COMFORT E TURISMO: DAL PANORAMA ITALIANO A QUELLO MONDIALE

3.1. Introduzione

Nei luoghi all'aperto variabili ambientali quali la temperatura dell'aria, l'umidità relativa, la temperatura media radiante e la velocità del vento influenzano la pratica di attività sportive e culturali e, al tempo stesso, il benessere umano [175]. Lo stato di salute delle persone è infatti correlato alle reazioni fisiologiche e psicologiche derivanti dall'eventuale stress termico a cui esse sono sottoposte e le cui conseguenze possono essere più o meno marcate, a seconda della rapidità dei meccanismi di acclimatamento che il corpo umano riesce a mettere in atto [176]. Le moderne forme di turismo, fatte di spostamenti veloci verso destinazioni lontane e meteorologicamente molto diverse dai luoghi dove si vive abitualmente, non permettono però al corpo di adattarsi alle nuove condizioni, se non attraverso un certo transitorio temporale [177] durante il quale possono manifestarsi forme di discomfort.

La possibilità di svolgere piacevolmente attività all'aperto risulta quindi alla base di un eventuale viaggio, incidendo sulla scelta delle destinazioni. Su larga scala, tutto questo influenza i flussi turistici sia a breve che ad ampio raggio [178]. Luoghi caratterizzati da condizioni climatiche favorevoli risultano essere spesso tra le mete preferite dai turisti, che spesso, se hanno avuto percezioni positive del luogo, vi fanno ritorno. Ne discende che i valori assunti dalle variabili ambientali sono tra i criteri più importanti per la scelta del luogo delle vacanze [179].

Per tale ragione negli ultimi anni è aumentato l'interesse da parte degli stakeholder ad investigare come la percezione termoigrometrica degli individui influenzi il settore turistico. Una migliore comprensione di quella che è la risposta fisiologica e psicologica alle diverse condizioni ambientali può infatti aiutare nella pianificazione della domanda di visitatori da tutto il mondo. Ciò permetterebbe di regolare e rendere sostenibili i flussi di persone che il settore turistico movimentata attraverso i cinque continenti. Da questo punto di vista si stima che i viaggi per turismo possano arrivare a muovere 1.6 miliardi di persone nel 2020 [180].

Una chiave di lettura delle necessità turistiche può essere proprio legata all'analisi delle aspettative delle persone relativamente alle condizioni meteo dei luoghi di destinazione [181]. Molti studi hanno sottolineato come il meteo ed il clima risultino influenzare la presenza di visitatori, con ricadute sull'industria turistica sia di Paesi sviluppati che in via di sviluppo [182]. Tutto ciò deve poi essere analizzato considerando la capacità del turismo di stimolare la crescita dell'industria tradizionale (manifatturiera) e di quella dei servizi (commercio e trasporti) ad esso correlati [183]. Nasce conseguentemente un settore nuovo nel panorama della ricerca, la "tourism climatology", che studia l'interazione tra il clima ed il benessere termoigrometrico per quelle particolari località che risultano vocate, per loro stessa natura, ad essere mete di vacanze.

Uno tra i Paesi caratterizzati dalla maggior presenza di turisti è proprio l'Italia [184], che è meta di consistenti flussi di visitatori sia interni che internazionali. Proprio da questo assunto nasce lo studio presentato in questo lavoro.

L'obiettivo è quello di analizzare, in funzione della destinazione, i migliori periodi dell'anno per pianificare un viaggio su tutto il territorio italiano. Si è voluto capire come, al variare delle stagioni, le condizioni meteorologiche possano influenzare il potenziale turistico della penisola italiana in re-

lazione all'outdoor thermal comfort ed alla risposta fisiologica dei potenziali turisti. Questa indagine è stata condotta sia in funzione di un turismo interno (costituito da individui già abituati alle condizioni climatiche tipiche dell'area mediterranea) sia in funzione di un turismo più internazionale (con individui abituati ad altre realtà climatiche). Per i primi è stato utilizzato come indice di valutazione il Mediterranean Outdoor Comfort Index (MOCI) [26], per i secondi il Predicted Mean Vote (PMV) nella sua versione adattata allo studio del benessere in luoghi aperti [159].

In particolare, per fornire informazioni attraverso una rappresentazione di semplice lettura, ci si è posti l'obiettivo di creare delle mappe dove i risultati sono stati presentati mostrando le variazioni spaziali di tali indici in funzione delle stagioni dell'anno. Oltre a questa rappresentazione generale riguardante tutto il territorio italiano, per alcune specifiche località i dati a disposizione sono stati ulteriormente analizzati aumentando il grado di dettaglio dell'analisi.

3.2. L'area studiata

3.2.1. Classificazione climatica ed informazioni meteorologiche

L'Italia è una regione del sud Europa compresa tra il 47° ed il 36° parallelo nord e si trova nella parte centrale della zona temperata dell'emisfero boreale. Il suo territorio, circondato su tre lati dal mar Mediterraneo, gode di un clima mite, con differenze legate alla morfologia, ricca di catene montuose sia verso il suo confine settentrionale (le Alpi) che lungo la sua dorsale (gli Appennini). In alcune stagioni dell'anno, la penisola italiana risente in parte di correnti occidentali di natura atlantica. Secondo la classificazione di Köppen-Geiger [24], l'Italia vede la presenza di diversi tipi di clima, riassunti in Fig. 3.1 ed in Tab. 3.1.

Figura 3.1. Mappa orografica dell'Italia e rappresentazione dei climi presenti secondo la classificazione di Köppen-Geiger [24].

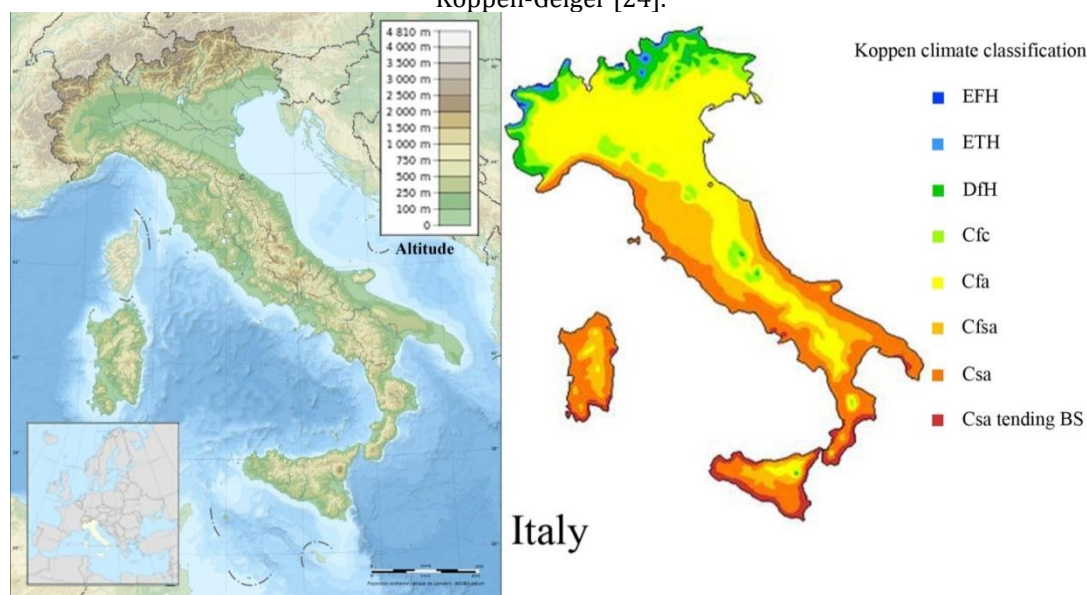


Tabella 3.1. Classificazione secondo Köppen-Geiger [24] dei climi presenti in Italia.

Classificazione	Tipo di clima	Localizzazione geografica in Italia
Csa tendente a BS	Temperato subtropicale	Zone costiere più meridionali
Csa	Temperato caldo	Zone di bassa quota del centro e del sud
Cfsa	Temperato di transizione	Zone a bassa quota nel nord
Cfa	Temperato ad estate calda	Bassi versanti della Pianura Padana
Cfc	Temperato fresco	Zone prealpine ed appenniniche
DfH	Temperato freddo	Arco alpino e zone appenniniche elevate
Eth	Freddo della tundra	Arco alpino a quote elevate
Efh	Nevi perenni	Cime alpine

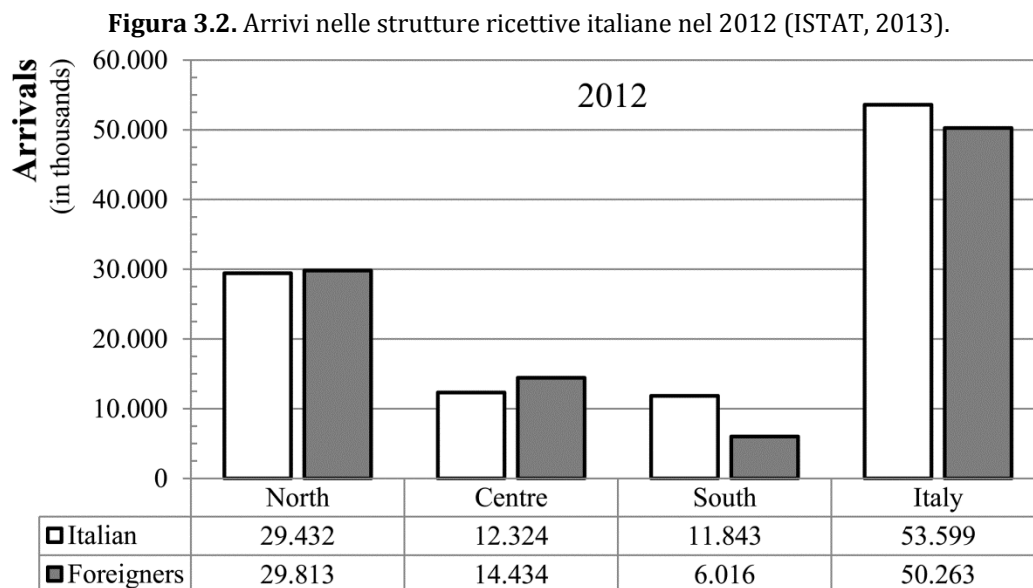
Durante l'anno questa varietà di climi comporta temperature medie riassumibili come segue:

- minime che vanno dai -8.8°C del Nord agli 0.6°C del Sud, passando per i -2.8°C del Centro, con una media nazionale intorno ai -4.0°C
- medie che vanno da 11.6°C del Nord agli 15.7°C del Sud, passando per i 14.5°C del Centro, con una media nazionale intorno ai 14.0°C;
- massime che vanno da 31.6°C del Nord agli 34.8°C del Sud, passando per i 32.9°C del Centro, con una media nazionale intorno ai 33.1°C.

Per quanto concerne la radiazione solare globale al suolo, i valori minimi si hanno in Alto Adige ed in Friuli mentre quelli massimi nella Sicilia meridionale. Si va dai circa 4,370 MJ/m² anno in provincia di Bolzano, agli oltre 6,040 MJ/m² anno in provincia di Siracusa in Sicilia [24].

3.2.2. Dati relativi ai flussi turistici

Con riferimento al 2012, la distribuzione territoriale degli arrivi nelle strutture ricettive italiane è riportata in Fig. 3.2 [184].

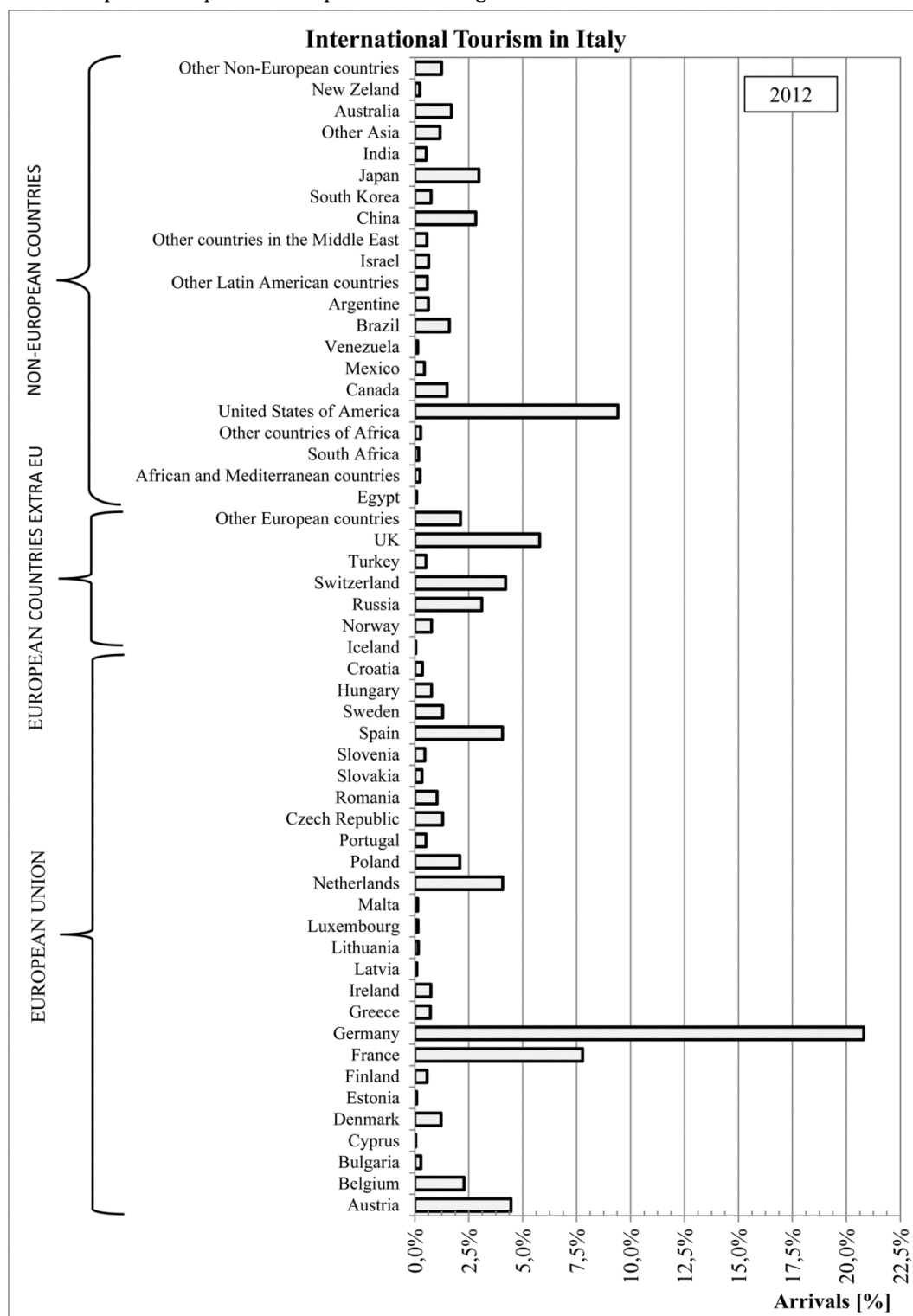


Il Nord resta la meta preferita sia dai residenti che dagli stranieri, i quali con il 28.7% del totale superano le presenze della clientela nazionale. Con riferimento alle altre zone territoriali, si nota un buon apporto della componente straniera nel Centro dove, essendo pari al 13.9% su un totale del 25.8%, si conferma ancora maggiore della componente residente. Il Sud vede invece un 17.2% della presenza totale con predominanza dei residenti (11.4%). Considerando la distribuzione delle presenze per regione di destinazione, emergono poi alcune differenze. La componente residente si concentra in quattro regioni: Veneto, Trentino-Alto Adige, Toscana e Lazio. I turisti stranieri prediligono invece Emilia-Romagna, Veneto, Toscana e Trentino-Alto Adige.

Per quanto concerne invece la nazionalità dei turisti stranieri (Fig. 3.3), appare rilevante la presenza tedesca. Per i Paesi europei extra EU, si registra un considerevole afflusso di inglesi e svizzeri mentre gli americani che risultano essere la percentuale più elevata di turisti non Europei presenti in Italia.

Questa prevalenza di turisti del nord Europa ha influenzato la scelta dell'indice di comfort termico utilizzato per l'analisi svolta in questo lavoro. Il PMV, nato da indagini statistiche su un campione di individui originario di paesi appartenenti a quell'area geografica, permette di valutare meglio le differenti risposte psicofisiche alle condizioni climatiche italiane rispetto alla popolazione locale, a cui è stato associato invece il MOCI [99].

Figura 3.3. Composizione per Paesi di provenienza degli arrivi di turisti stranieri in Italia nel 2012 [184].

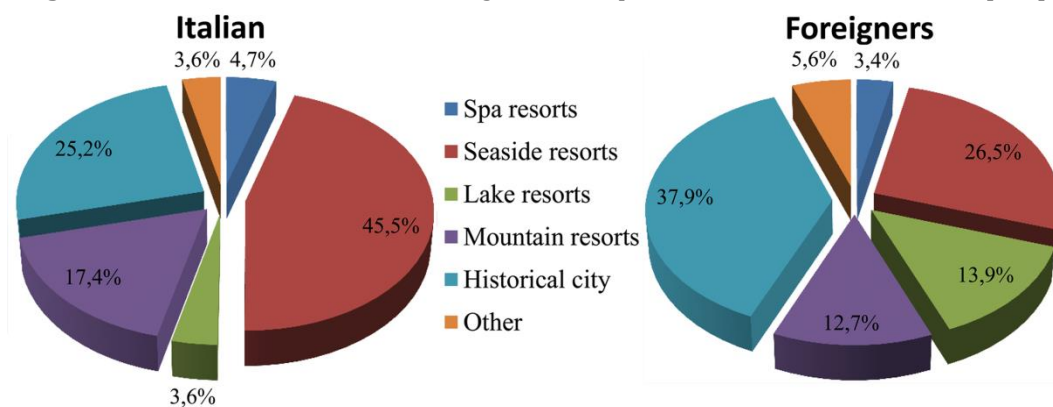


Con riferimento al periodo scelto per effettuare i viaggi, vi è una preferenza per i mesi estivi. Se si osservano per trimestre i valori percentuali di coloro che hanno effettuato almeno una vacanza lunga in Italia, i dati dicono che i turisti sono stati pari al 33.9% nel terzo trimestre, al 7.9% nel se-

condo trimestre, al 6.1% nel primo ed al 5.3% nell'ultimo trimestre del 2011. Al contrario, se si osserva l'aggregato dei turisti che hanno avuto delle vacanze brevi, le percentuali risultano più equamente distribuite tra i diversi trimestri e le differenze sono più contenute. La percentuale più alta, pari al 13.0%, si riscontra in corrispondenza del trimestre primaverile; nei restanti, essa è stata del 10,5% tra luglio e settembre, dell'8,6% tra ottobre e dicembre e del 7,9% tra gennaio e marzo.

Residenti e stranieri manifestano inoltre preferenze diverse per quanto riguarda le mete delle loro vacanze. In Fig. 3.4 è possibile notare come gli italiani abbiano manifestato una maggior preferenza verso le località di mare rispetto ai turisti stranieri. Questi ultimi hanno invece speso le loro vacanze prevalentemente in città d'arte.

Figura 3.4. Mete finali dei residenti e degli stranieri per le vacanze in Italia nel 2012 [184].



3.2.3. Dati meteorologici

Per poter svolgere questo studio con l'obiettivo di fornire indicazioni quanto più precise possibili, è risultato di fondamentale importanza avere a disposizione dati meteorologici affidabili e certificati. A tal fine sono stati richiesti al servizio meteorologico dell'Aeronautica Militare Italiana i dati storici degli ultimi 20 anni (dal 1985 al 2015) per creare il cosiddetto anno tipo. Ciò è stato fatto per tutte le postazioni di rilevazione di loro competenza presenti sul territorio nazionale (119 località distribuite in maniera uniforme su tutto il Paese, molte delle quali in corrispondenza degli aeroporti italiani).

Sono stati quindi messi a disposizione i valori orari delle seguenti grandezze:

- temperatura dell'aria a 2 m (T_A) [$^{\circ}\text{C}$];
- umidità relativa (RH) [%];
- velocità del vento al livello del suolo (WS_0) e a 10 m da esso (WS_{10}) (m s^{-1});
- radiazione solare al suolo ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$).

Grazie all'utilizzo di questi dati è stato possibile calcolare i valori orari su tutto il territorio italiano degli indici di comfort termico. Dipendendo questi indici dalla temperatura media radiante (T_{MR}), questa può essere dedotta secondo i modelli MEMI e MEMEX [185] in accordo con quanto fatto da Ge et al. [186]. Risulta quindi calcolabile grazie alla Eq. (34) [187]:

$$T_{MR} = \left[\frac{\left(\frac{R}{I_{rc}} + L_g + L_a \right)}{s_h \cdot \sigma} \right]^{0.25} - 273 \quad (34)$$

dove:

– L_a (Eq. (35)) è rappresentativo degli scambi radiativi tra il corpo umano e l'atmosfera ($W \cdot m^{-2}$):

$$L_a = s_h \cdot \sigma \cdot (273 + T_A)^4 \cdot (0.82 - 0.25 \cdot 10^{-0.094 \cdot e}) \quad (35)$$

– L_g (Eq. (36)) quantifica gli scambi radiative tra il corpo umano ed il suolo ($W \cdot m^{-2}$):

$$L_g = s_h \cdot \sigma \cdot (273 + T_g)^4 \quad (36)$$

- R è la radiazione solare assorbita ($W \cdot m^{-2}$);
- I_{rc} è un coefficiente adimensionale atto a ridurre l'entità degli scambi radiativi e convettivi a causa della presenza del vestiario;
- $s_h = 0.95$ è l'emissività associate al corpo umano;
- $\sigma = 5.667 \cdot 10^{-8}$ è la costante di Stefan-Boltzmann ($W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}$);
- T_g è la temperatura del suolo ($^{\circ}C$): i) per $N \geq 80\%$: $T_g = T_A$; ii) per $N < 80\%$ e $T_A \geq 0$: $T_g = 1.25 \cdot T_A$; per $N < 80\%$ e $T_A < 0$: $T_g = 0.9 \cdot T_A$.

3.3. Risultati

Per poter trarne informazioni utili da un punto di vista turistico, i dati metereologici sono stati analizzati durante le ore diurne, in un intervallo orario compreso tra le 8.00 e le 22.00. Tale scelta è stata fatta in accordo con precedenti studi [188] per valutare il comfort durante quei momenti della giornata in cui i turisti solitamente svolgono attività all'aperto e sono esposti alle condizioni esterne. In particolare è stato così possibile definire quei periodi in cui è perseguibile una percezione di neutralità termica e la rispettiva frequenza.

L'analisi, come detto in precedenza, è stata eseguita utilizzando i dati metereologici di ciascuna centralina di rilevazione a disposizione. In particolare, è stata approfondita per Venezia, Roma e Palermo, le tre città caratterizzate dal maggior numero di visitatori per il nord, il centro ed il sud Italia rispettivamente (Tab. 3.2).

Tabella 3.2. Città turistiche per il nord, centro e sud Italia scelte per l'analisi dei dati.

City	Latitude ($^{\circ}N$)	Longitude ($^{\circ}E$)	Elevation (m)	Köppen classification	Annual tourist arrivals
Venice	45°26'23"28	12°19'54"84	2	Cfa	8,373,291
Rome	41°54'39"24	12°28'54"48	20	Csa	10,813,231
Palermo	38°6'43"56	13°20'11"76	14	Csa tending Bs	3,072,817

I risultati ottenuti per queste città vengono riassunti in Tab. 3.3. Sono stati calcolati: i) i valori medi stagionali della temperatura dell'aria T_A [$^{\circ}C$], del MOCI e del PMV; ii) il numero di giorni di comfort termico durante l'intero anno; iii) il valore massimo e minimo delle medie settimanali durante tutto l'anno per la temperatura dell'aria T_A [$^{\circ}C$], per il MOCI e per il PMV; iv) il valore massimo, medio e minimo dei valori orari annuali per la temperatura dell'aria T_A [$^{\circ}C$], per il MOCI e per il PMV.

Tabella 3.3. Riassunto dei risultati ottenuti per le città analizzate.

		Venice			Rome			Palermo		
		T _A [°C]	MOCI	PMV	T _A [°C]	MOCI	PMV	T _A [°C]	MOCI	PMV
Seasonal Averages	Spring	16.53	-0.08	0.30	17.44	0.07	0.52	18.57	0.14	0.61
	Summer	24.38	0.48	1.10	24.92	0.51	1.15	25.53	0.70	1.42
	Autumn	11.53	-0.082	-0.75	16.02	-0.63	-0.48	18.38	-0.53	-0.34
	Winter	4.75	-1.16	-1.24	9.04	-0.98	-0.98	13.23	-0.84	-0.78
Weekly Averages	Min	2.26	0.84	-1.74	6.30	-1.26	-1.38	10.59	-1.25	-1.36
	Max	29.00	-1.51	1.62	27.08	0.88	1.67	27.21	1.02	1.87
Hourly	Min	-5.80	-2.79	-3.56	-4.20	-2.50	-3.15	5.90	-2.81	-3.59
	Average	13.14	-0.66	-0.52	15.24	-0.56	-0.38	18.42	-0.46	-0.24
	Max	33.60	2.46	3.92	31.20	2.58	4.09	34.60	3.20	4.97
Thermal Comfort	N° Of Day	67	121	79	81	152	95	107	140	94

Dalla Tab. 3.3 è possibile notare come, analizzando il benessere termoigrometrico attraverso il MOCI, la percezione delle condizioni climatiche nelle stagioni più calde si sposta verso il range di comfort termico (-0.5÷+0.5). Ciò si traduce in una maggiore tolleranza al caldo dei popoli mediterranei rispetto a quelli nord europei. Venezia risulta poi una città decisamente più fredda in inverno rispetto a Roma e Palermo, che diventa invece poco vivibile in estate. Dai dati risulta inoltre che, per stare nella zona considerata di benessere, i migliori periodi sono le mezze stagioni (primavera e autunno). Da sottolineare anche come i nord europei potrebbero ritenere Palermo piacevole in inverno mentre la città che risulta avere il maggior numero di giorni di comfort è Roma (in accordo ad entrambi gli indici). Se si tenesse invece conto solo della temperatura dell'aria, la città con più giorni di comfort sarebbe Palermo. E' inoltre possibile notare come i turisti locali godano di un numero di giorni confortevoli maggiore mediamente del 35% rispetto ai visitatori stranieri.

Nel prosieguo del lavoro, per queste città verranno fornite informazioni temporali più dettagliate grazie a grafici orari e valutazioni su dati medi settimanali. Indicazioni spaziali sull'intera penisola italiana verranno invece fornite attraverso mappe territoriali sulla base di valori medi stagionali.

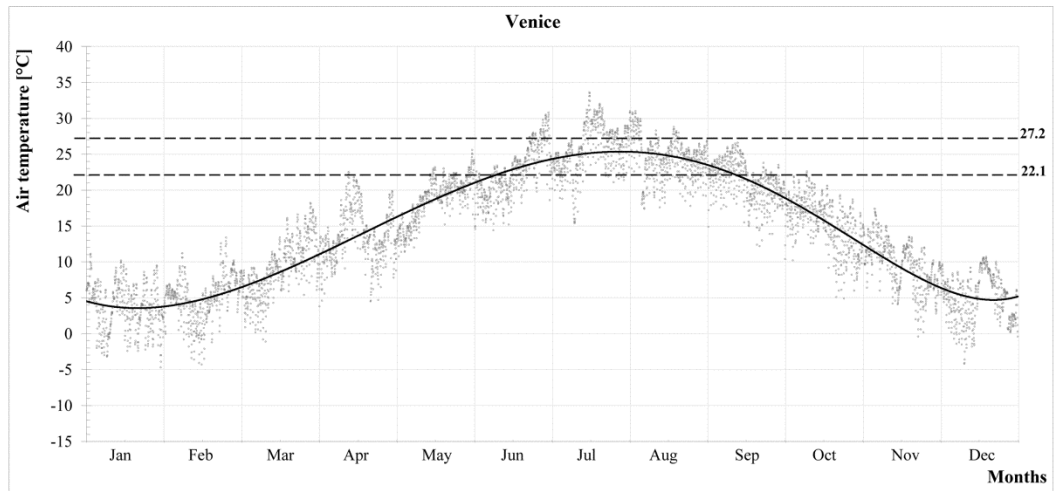
3.3.1. Andamenti orari annuali di temperatura dell'aria, MOCI e PMV

Per ciascuna città analizzata (Venezia, Fig. 3.5; Roma, Fig. 3.6; Palermo, Fig. 3.7) sono stati graficati gli andamenti annuali nella fascia oraria 8.00÷22.00 di temperatura dell'aria T_A, MOCI e PMV.

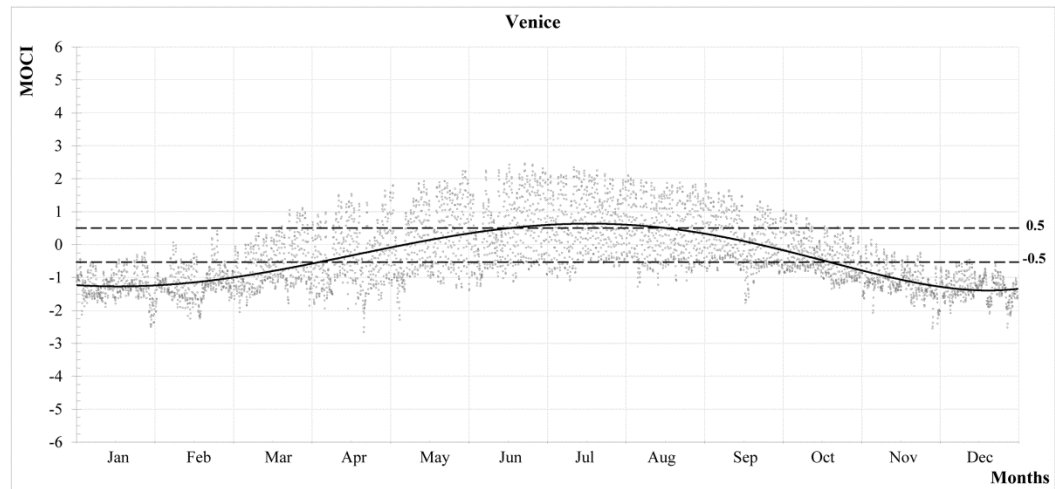
In generale è possibile notare come i periodi in cui gli indicatori rientrano nella fascia di benessere sono molto più ampi rispetto a quelli in cui la temperatura dell'aria risulta nell'intervallo ottimale. Questo ci permette di sottolineare l'influenza delle altre variabili che intervengono nei modelli alla base degli indici sulla percezione globale del clima.

Figura 3.5. Venezia: andamento orario annuale della temperatura dell'aria T_A , del MOCI e del PMV.

Annual air temperature (8÷22 h)



Annual MOCI (8÷22 h)



Annual PMV (8÷22 h)

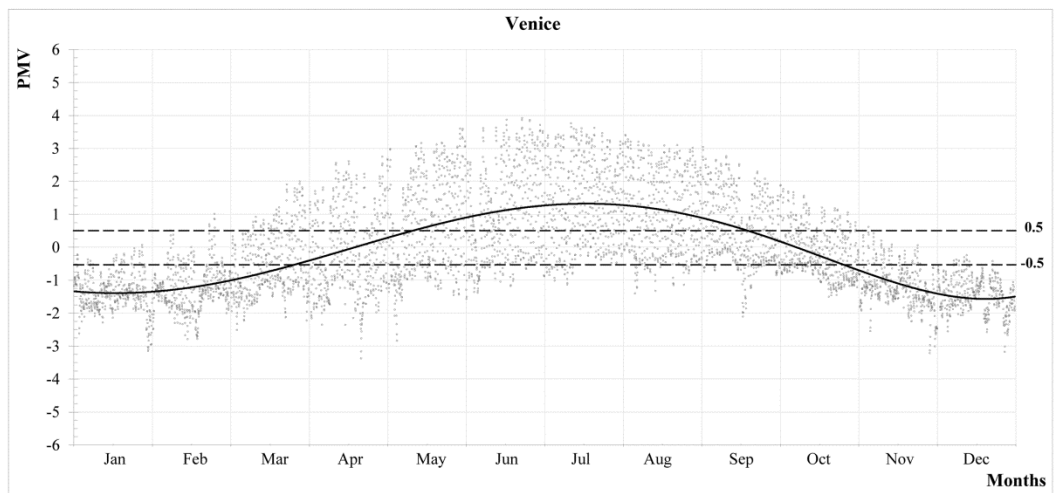
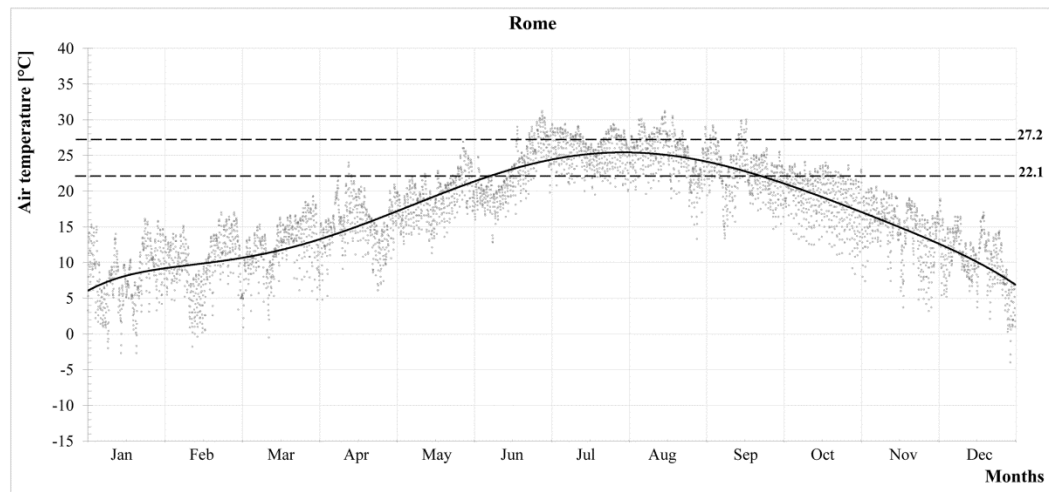
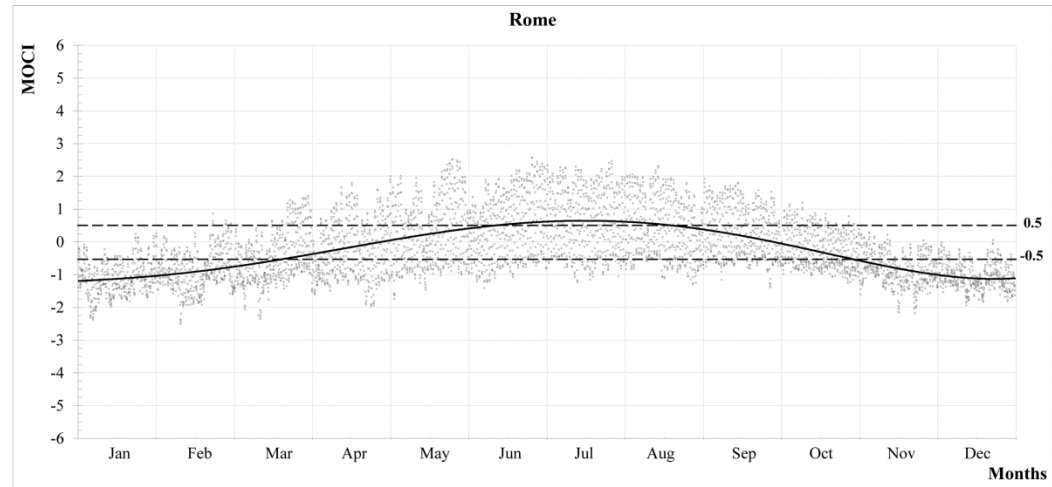


Figura 3.6. Roma: andamento orario annuale della temperatura dell'aria T_A , del MOCI e del PMV.

Annual air temperature (8÷22 h)



Annual MOCI (8÷22 h)



Annual PMV (8÷22 h)

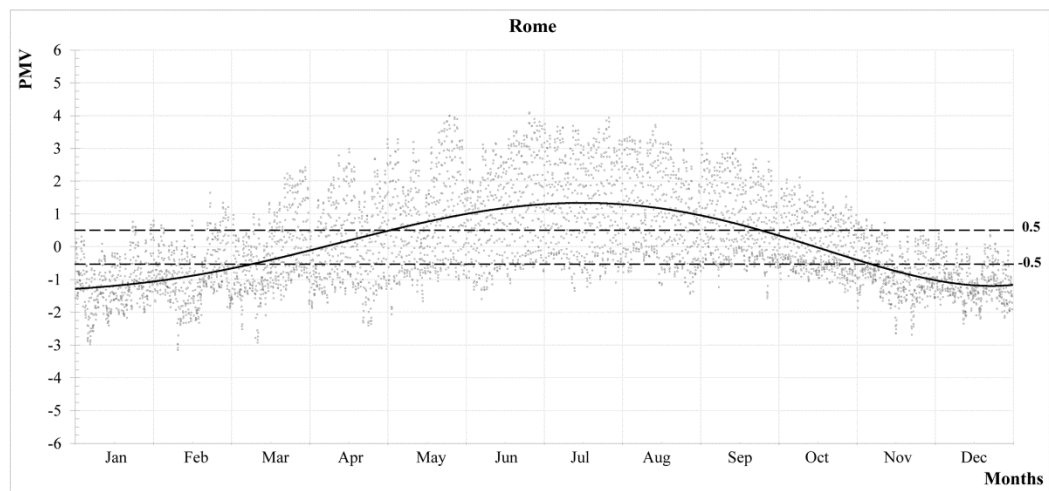
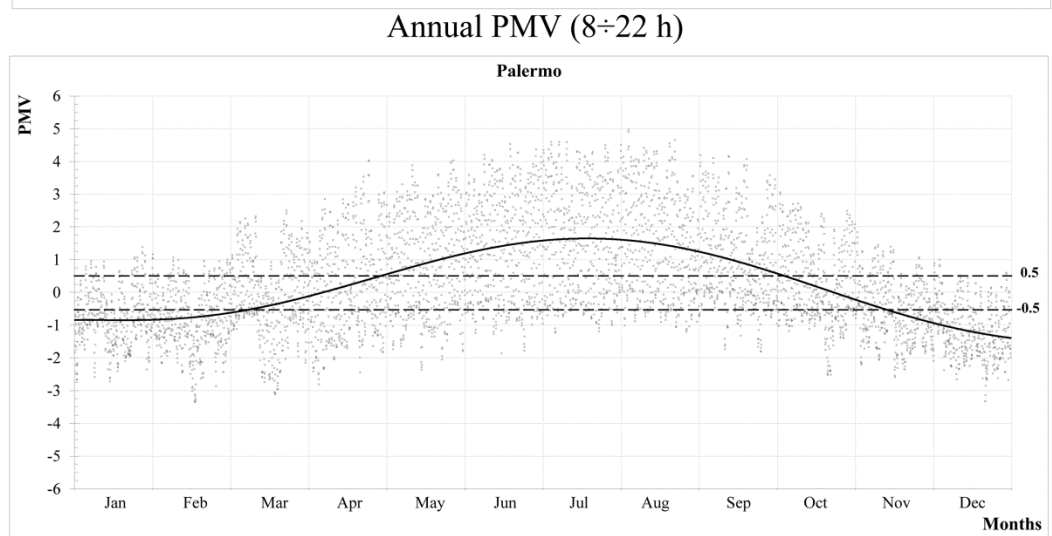
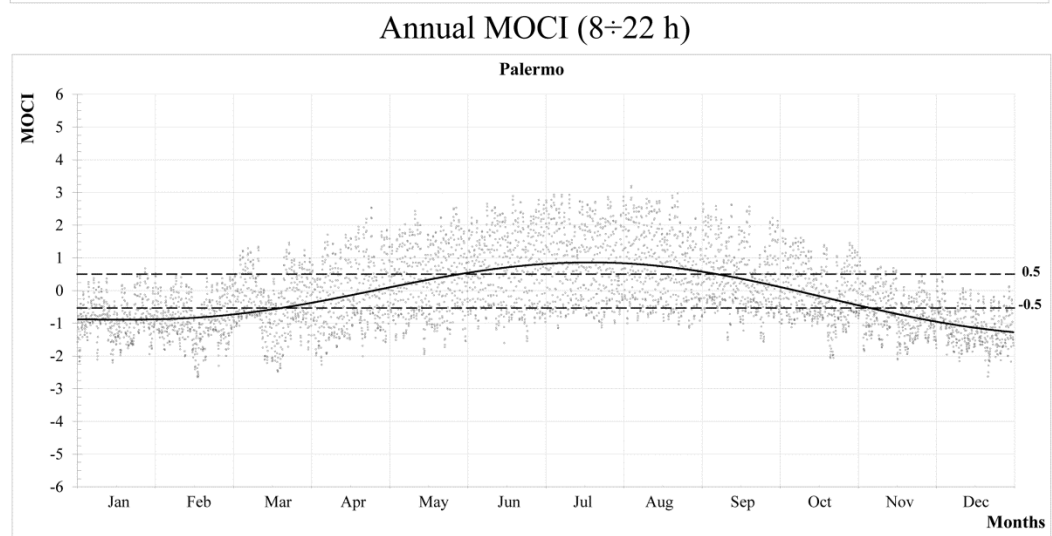
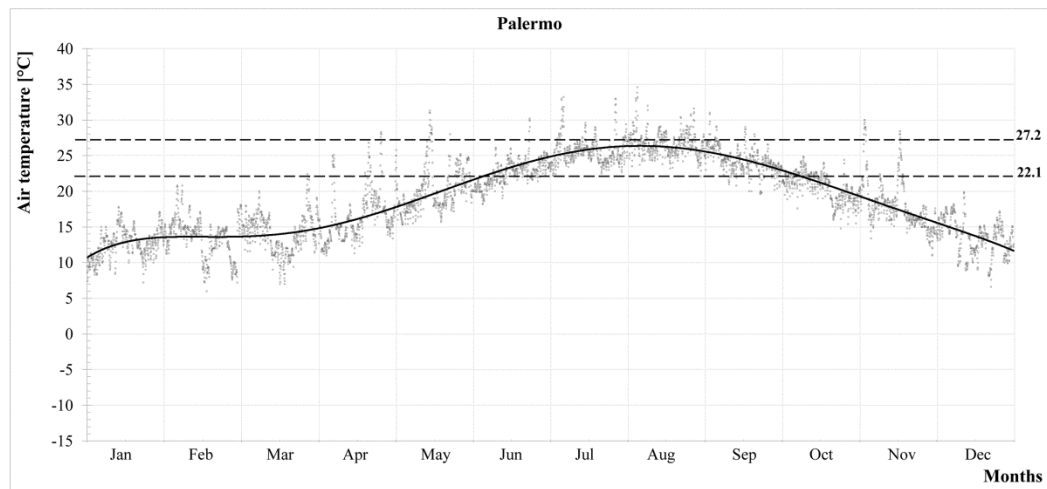


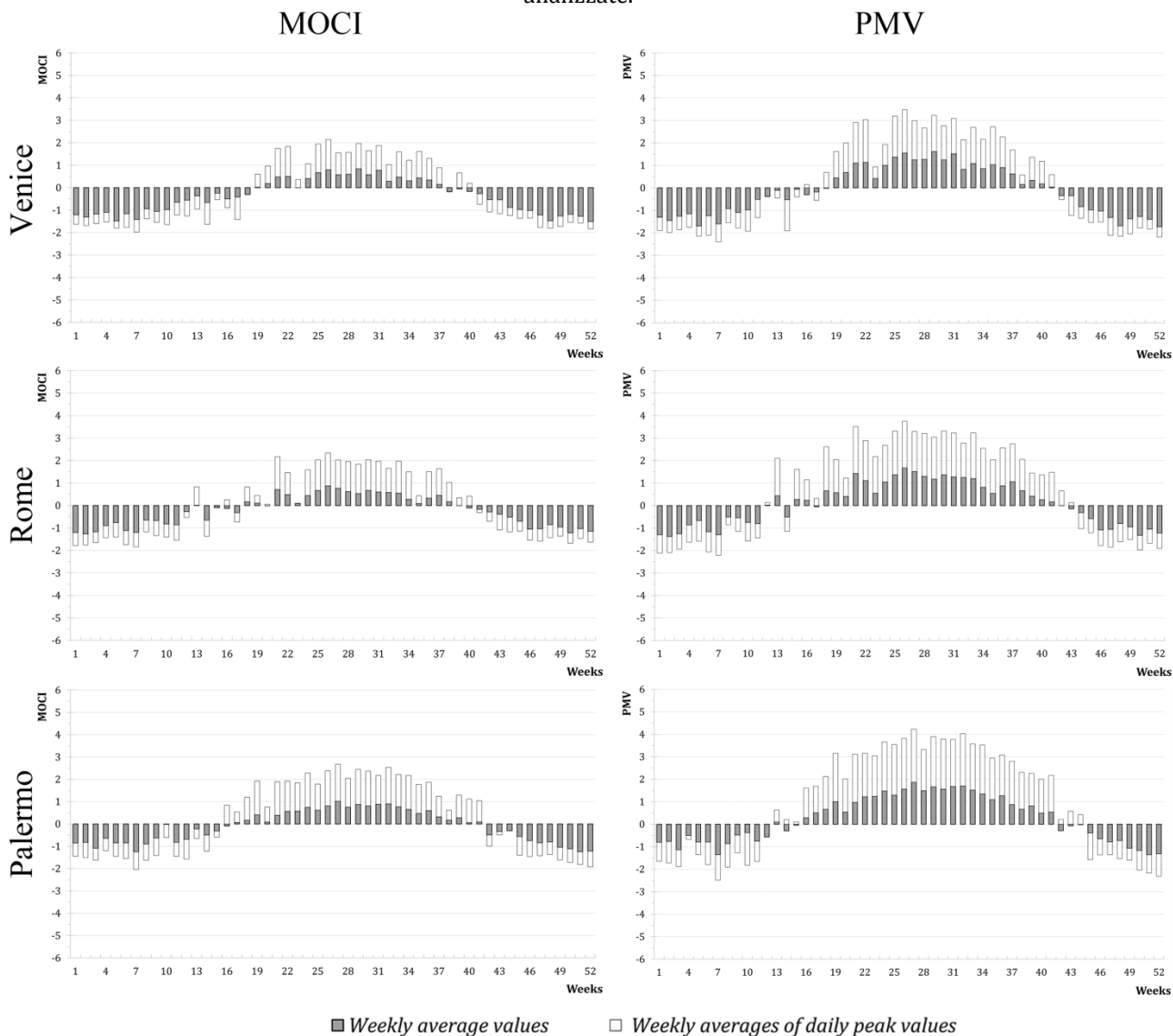
Figura 3.7. Palermo: andamento orario annuale della temperatura dell'aria $T_{A,}$ del MOCI e del PMV.
Annual air temperature (8÷22 h)



3.3.2. Frequenze relative alla percezione termica e percentili

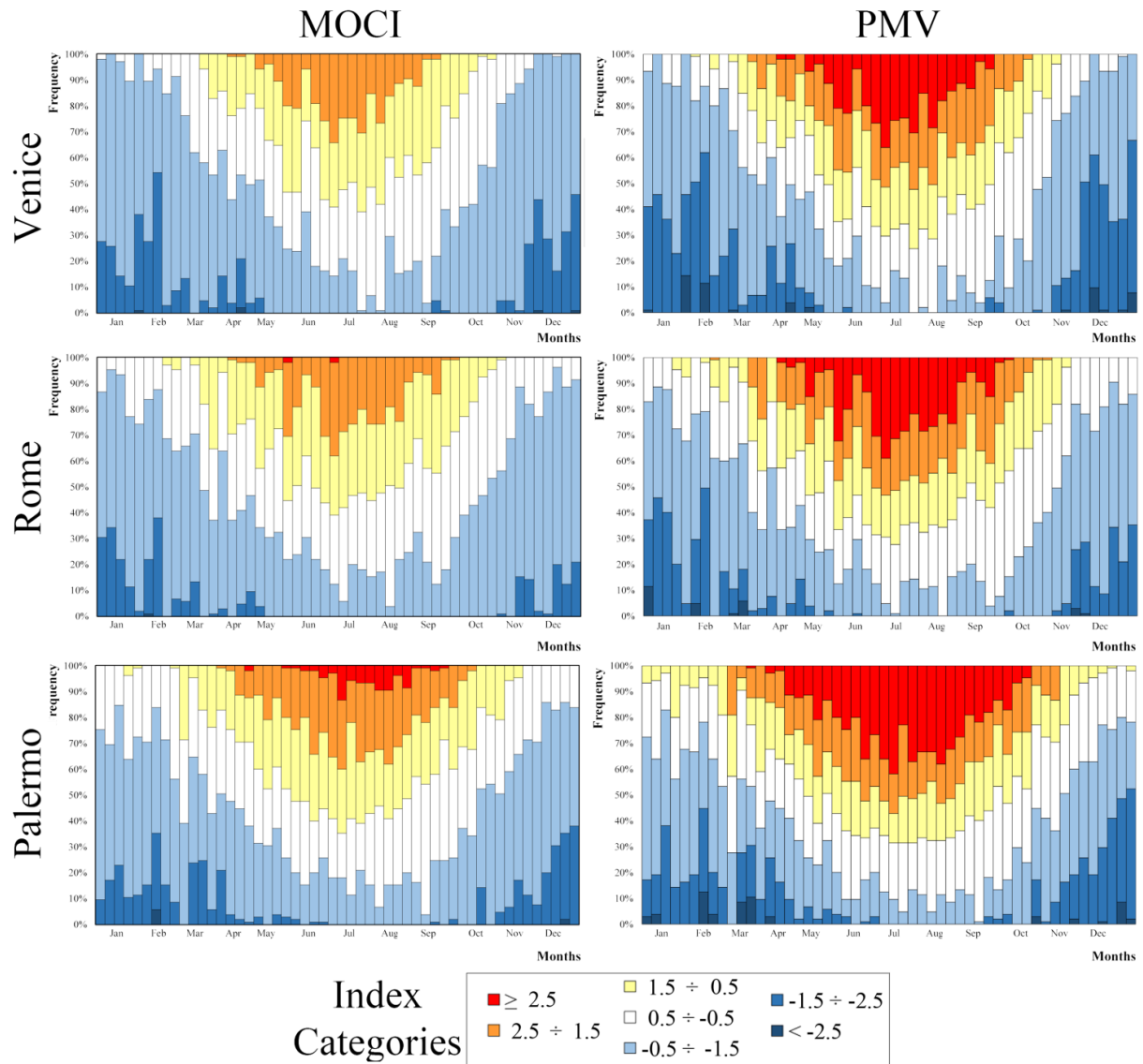
Sulla base di precedenti studi [182], appare interessante fornire informazioni circa la frequenza con cui si manifestano determinati valori degli indici studiati. Per tale ragione l'anno è stato suddiviso in settimane e dai dati climatici orari a disposizione ne sono stati calcolati i valori medi del MOCI e del PMV. La Fig. 3.8 mostra quindi per ciascuna città esaminata tali valori medi unitamente ai picchi massimi raggiunti.

Figura 3.8. Valori medi settimanali e relativi picchi del MOCI e del PMV durante l'intero anno per le città analizzate.



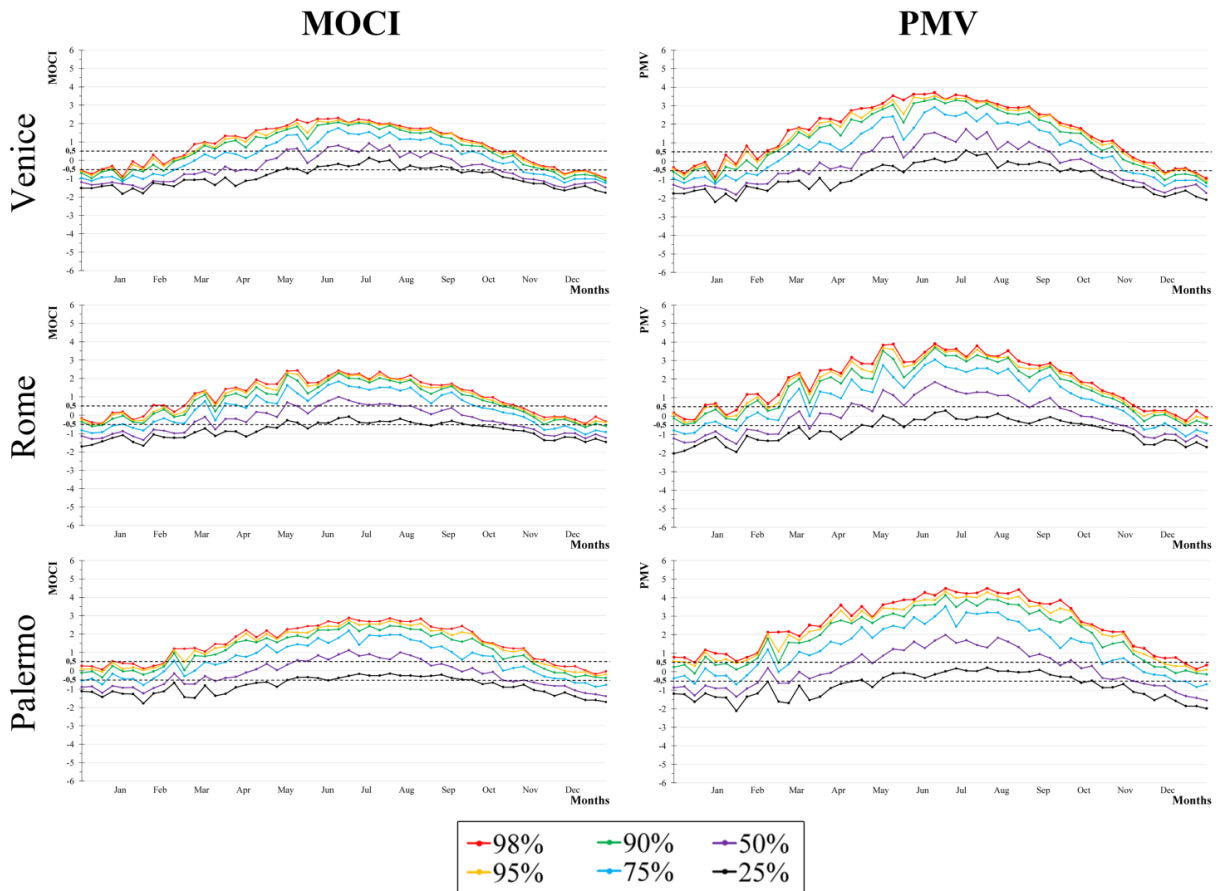
La Fig. 3.9 fornisce invece una rappresentazione delle frequenze con cui dati intervalli di valori degli indici di comfort termico si manifestano per ciascuna settimana dell'anno.

Figura 3.9. Istogrammi rappresentativi delle frequenze con cui determinati valori del MOCI e del PMV si verificano nelle città analizzate.



Per le medesime settimane, in Fig. 3.10 sono poi riportati i percentili associati ai valori di MOCI e PMV [189]. Più sono alti i valori di percentile, maggiore è la frequenza con cui si presentano quei valori dell'indicatore di benessere nella settimana in questione.

Figura 3.10. Variazioni dei percentili di MOCI e PMV nelle città analizzate.

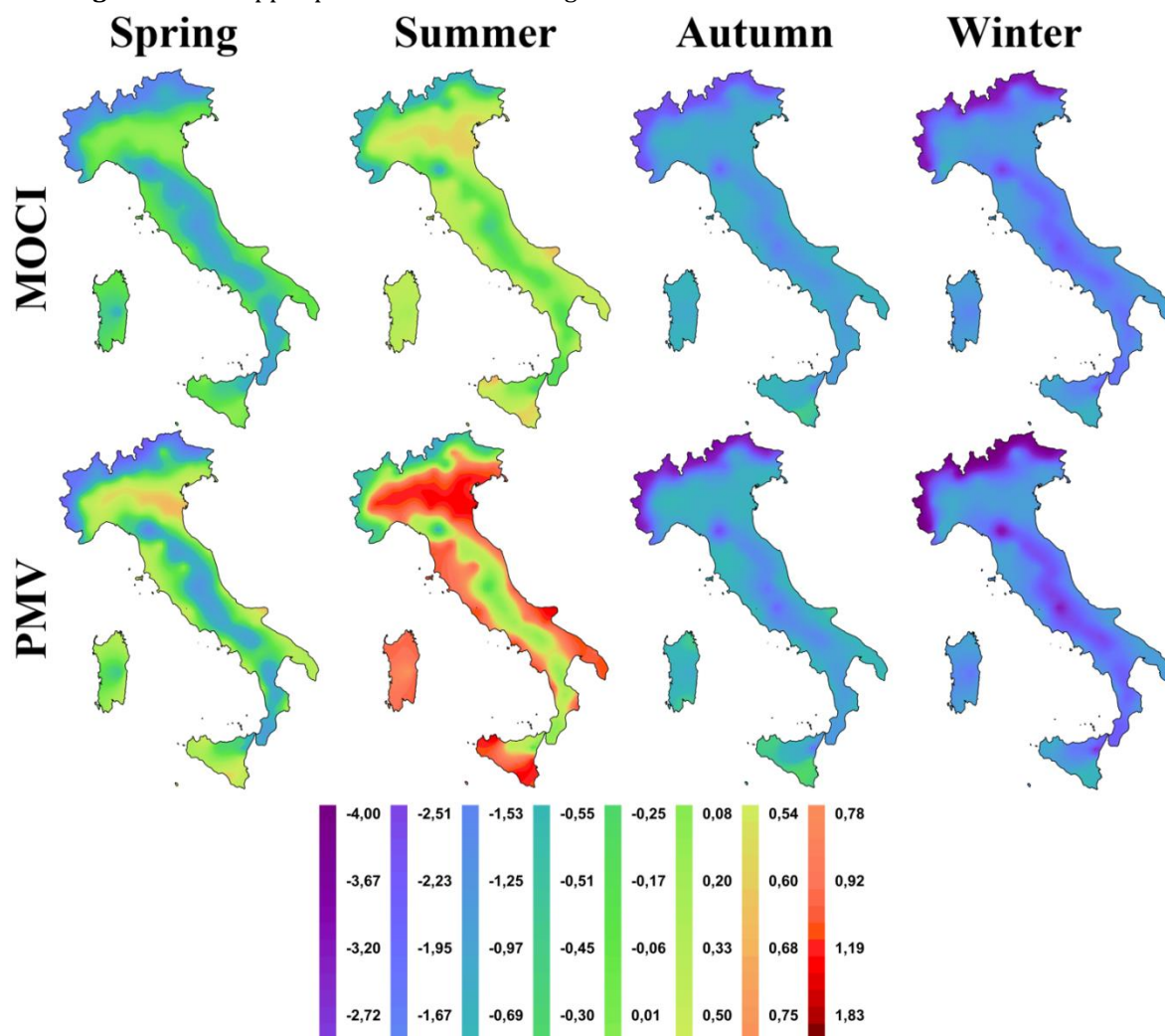


3.3.3. Mappe spaziali delle medie stagionali di MOCI e PMV

Per ogni stazione di campionamento dei dati meteo a disposizione, sono stati ricavati i valori stagionali medi dei due indici implementati. Per creare le mappe isolivello della distribuzione spaziale su tutto il territorio italiano, i valori intermedi (tra un nodo contenente l'informazione e l'altro) sono stati calcolati tramite una "Gaussian process regression". I dati sono stati infatti interpolati tramite la metodologia "kriging" (detta anche tecnica di predizione di Wiener-Kolmogorov), usata in geostatistica per minimizzare l'errore quadratico medio [190].

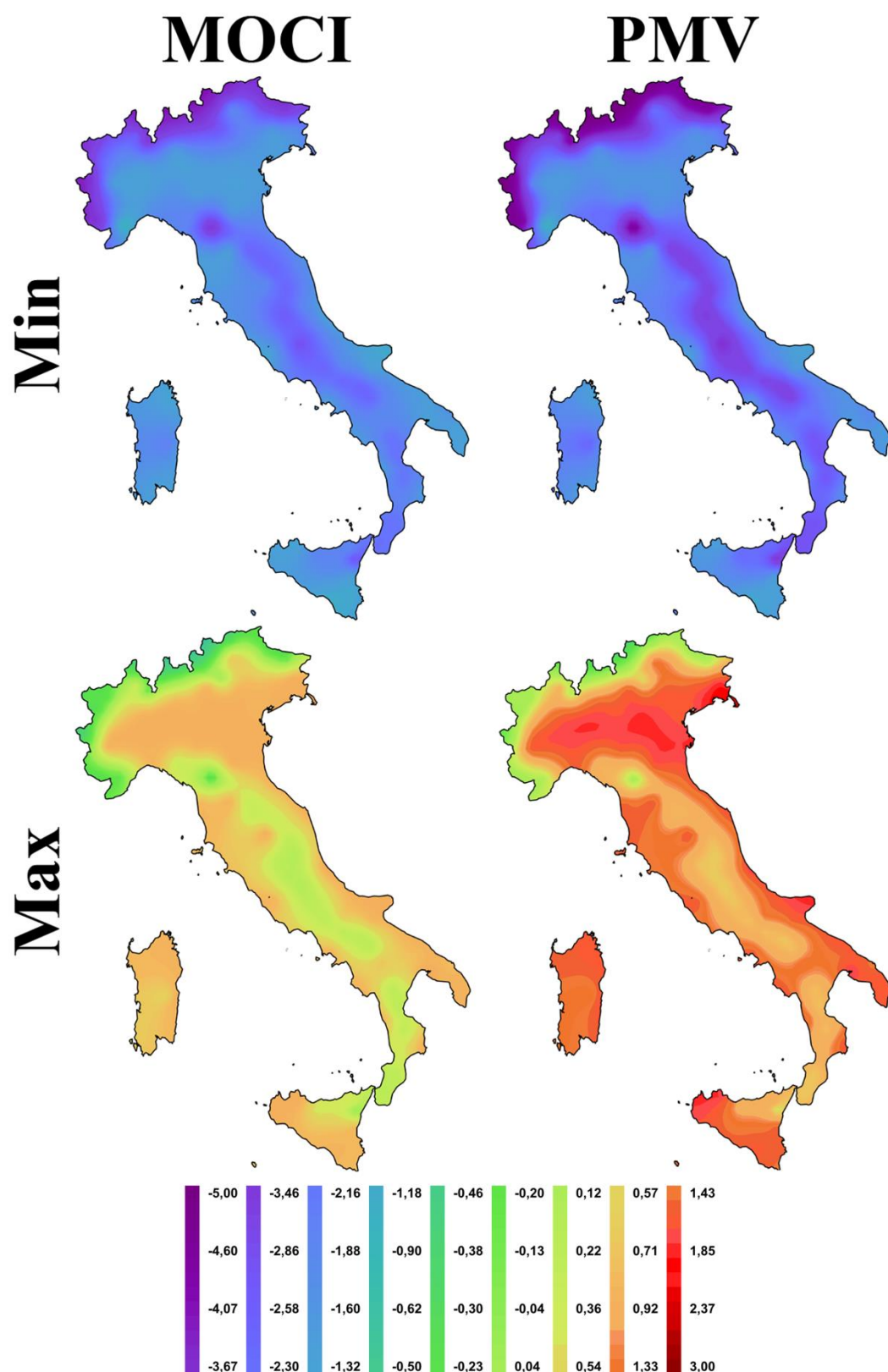
In Fig. 3.11 sono quindi rappresentate le mappe (relativamente ai valori medi stagionali) del MOCI e del PMV per il territorio italiano.

Figura 3.11. Mappe spaziali delle medie stagionali del MOCI e del PMV sul territorio italiano.



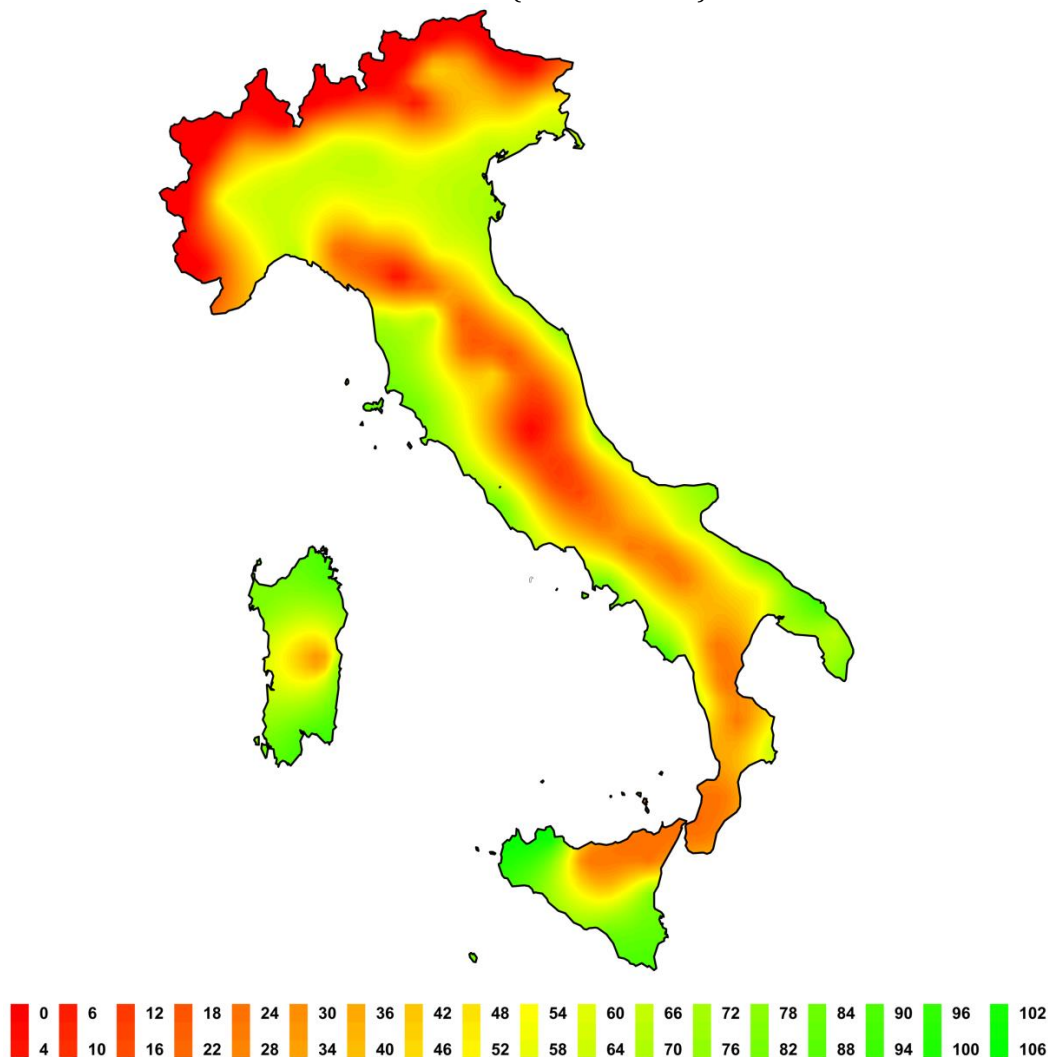
Differentemente la Fig. 3.12 riassume i valori estremi settimanali del MOCI e del PMV indipendentemente dalla loro contemporaneità sul territorio.

Figura 3.12. Mappe spaziali dei valori estremi (non contemporanei) delle medie settimanali per il MOCI ed il PMV sul territorio italiano durante l'intero anno.



In un precedente lavoro [26], era stato inoltre definito il range della temperatura dell'aria ($22.1^{\circ}\text{C} \div 27.2^{\circ}\text{C}$) percepito come neutrale ai fini del benessere in luoghi esterni. Analogamente a quanto fatto in un altro studio da Ge et al. [186], è stato quindi possibile costruire una mappa spaziale dove vengono rappresentate le somme dei giorni dell'anno in cui la temperatura rientra mediamente nel suddetto intervallo. Tali risultati sono stati rappresentati in Fig. 3.13.

Figura 3.13. Mappa spaziale delle somme dei giorni dell'anno in cui la temperatura rientra mediamente nell'intervallo ($22.1^{\circ}\text{C} \div 27.2^{\circ}\text{C}$).



3.4. Discussioni

3.4.1. Analisi temporale nelle località studiate

Per fornire indicazioni utili a governare i flussi turistici, l'analisi dei parametri climatici e degli indici di benessere non può basarsi su valori medi o estremi. Uno studio atto a fornire informazioni adeguate deve elaborare dati su periodi non troppo estesi e fittanti con le esigenze del settore turistico. Per questo sono state analizzate le condizioni medie e la frequenza degli eventi durante ciascuna settimana. Va sottolineato che ciò permette di limare i valori estremi relativi ai singoli picchi orari (che si verificano tra le 8.00 e le 2.00 di ogni giorno dell'anno).

Dalla Fig. 3.9 si può notare come, nelle città italiane analizzate, la percezione termica misurata tramite il PMV (turismo straniero) denota uno stato di discomfort per un'eccessiva percezione del caldo nei mesi che vanno dalla tarda primavera fino a fine estate. I valori risultano invece mitigati, nelle città di Venezia e Roma, se valutati attraverso il MOCI (turismo interno). Essendovi maggiormente abituata, la popolazione locale sopporta infatti meglio tali condizioni climatiche e ciò si traduce in una maggior frequenza di condizioni confortevoli. Va altresì notato come la città di Venezia risulta essere caratterizzata, con riferimento ai mesi invernali, da sollecitazioni termiche piuttosto gravose in virtù dei bassi valori di temperatura dell'aria raggiunti. Questo potrebbe penalizzare i flussi turistici in tale periodo, caratterizzato da alcune particolari festività come il suo celebre Carnevale. Dai grafici riportati in Fig. 3.9, è poi possibile notare come il maggior numero di settimane con valori ricadenti nel range $(-1.5) \div (+1.5)$ figuri nelle stagioni intermedie e come ciò accada meno frequentemente per il PMV rispetto al MOCI. Questo fa sì che, durante la primavera e l'autunno, possa essere praticato un turismo atto all'effettuazione di brevi viaggi in cui intraprendere attività come visitare città d'arte o finalizzato a percorsi enogastronomici in antichi borghi o località rurali.

In Fig. 3.10 sono stati invece utilizzati i percentili per quantificare quanto siano frequenti le condizioni in cui gli indici rientrano nella cosiddetta fascia di neutralità termica [188][189]. Valori elevati dei percentili (come 90th, 95th, 98th) sono rappresentativi di una percezione termoigrometrica piuttosto usuale durante la settimana indicata in ascissa sul grafico. Differentemente percentili bassi indicano che il corrispondente valore dell'indice si manifesta con una certa rarità. Ciò che emerge immediatamente dalla Fig. 3.10, è la maggiore sollecitazione termica riscontrata durante il periodo estivo in accordo al PMV. Da questo punto di vista, occorre ricordare che tale indice era stato sviluppato sulla base della percezione termica di individui afferenti all'Europa settentrionale e, conseguentemente, non acclimatati alle condizioni microclimatiche che possono verificarsi nella nostra penisola durante i mesi caldi. Inoltre, non è possibile agire su elementi quali il vestiario per operare un certo adattamento, come accade invece in inverno. Quanto detto è testimoniato dal fatto che, per il PMV, il percentile compreso nella fascia di neutralità termica è il 25th. Valori più elevati dei percentili in tale fascia sono poi rilevati per le stagioni intermedie. Il periodo in cui ciò si verifica risulta però essere più ampio per il MOCI rispetto al PMV, denotando ancora una volta la maggiore propensione degli individui locali a tollerare determinati valori delle variabili ambientali.

3.4.2. Analisi spaziale delle mappe del territorio italiano

Le mappe realizzate in Fig. 3.11 si basano sui valori medi stagionali degli indici calcolati. Ciò permette di smussare la percezione relativa ai valori estremi che si manifestano sul territorio italiano durante l'anno. In generale, tali mappe permettono di notare come l'Italia sia un paese caratterizzato da condizioni climatiche eterogenee, dipendenti sia dalla sua posizione geografica che dall'orografia del territorio. Essa si estende principalmente da nord verso sud e ciò comporta valori della radiazione solare molto variabili. La presenza del mar Mediterraneo opera poi un'azione mitigatrice mentre la presenza di importanti catene montuose causa forti escursioni termiche tra le zone poste in quota e quelle costiere.

Questo fa sì che sulle Alpi e lungo la dorsale appenninica si verifichino condizioni tali da condurre a sollecitazioni termiche di freddo intenso durante la stagione invernale e nelle mezze stagioni. Gli inverni risultano invece essere mediamente miti, quasi piacevoli, in alcune zone meridionali.

La situazione risulta essere differente in estate. In questo caso sono le regioni meridionali a sperimentare le condizioni più gravose dal punto di vista del comfort termoigrometrico, al pari della pianura Padana. La sua configurazione orografica conduce infatti a situazioni microclimatiche tali da originare alte temperature, scarsa ventosità e forte umidità. Da notare poi, con riferimento alle stagioni intermedie, una certa tendenza da parte delle aree meridionali ed insulari a divenire zone estremamente confortevoli. È comunque possibile, da un punto di vista generale, rilevare come attraverso il MOCI vengano stimate condizioni meno estreme rispetto a quanto accade tramite il PMV. Questo è senza dubbio dovuto al fatto che il MOCI è specificatamente calibrato sulla percezione termica della popolazione risiedente nell'area mediterranea ma, al tempo stesso, anche al fatto che il PMV era stato in origine sviluppato per essere usato in ambienti confinati. È quindi chiaro che, sebbene sia stato adattato ad essere usato in ambiente aperto, riesce difficilmente a stimare la sensazione termica a fronte di configurazioni climatiche lontane da quelle ravvisabili indoor.

Le mappe rappresentate in Fig. 3.12 ci permettono di valutare i valori estremi delle medie settimanali di MOCI e PMV sul territorio, indipendentemente dalla precisa settimana dell'anno in cui si manifestano. È quindi una rappresentazione di valori estremi non contemporanei e fornisce indicazioni sui minimi e sui massimi valori medi degli indici che un turista potrà trovare in una determinata area. Ne risulta che i minimi risultano essere, per entrambi gli indici, estremamente bassi sull'arco alpino, sulla dorsale appenninica e sull'Etna. Essi, a causa dell'orografia del territorio, vengono raggiunti in condizioni sinottiche differenti. Ad esempio i valori minimi sulle Alpi vengono solitamente registrati a seguito di irruzioni di aria di tipo artico, estremamente fredda a quote elevate. Con riferimento alla catena degli Appennini, i valori estremali vengono invece riportati a seguito di irruzioni di aria continentale. Essa arriva dalle steppe russo-siberiane e, risultando pellicolare, sarà gelida a tutte le quote. Valori estremi più miti vengono poi rilevati per zone quali le coste pugliesi, sarde e siciliane. La situazione risulta essere differente se, ad essere considerati, sono i massimi. In questo caso infatti gli Appennini risultano caratterizzati da condizioni confortevoli mentre le aree costiere e padane conducono ad una percezione termica di caldo. Tale discorso acquista ancor più valori se le valutazioni sono fatte per i turisti stranieri: il PMV assume infatti valori medi massimi

superiori a 2 nella pianura Padana, nella Sardegna settentrionale, nella Sicilia meridionale ed in alcune zone pugliesi.

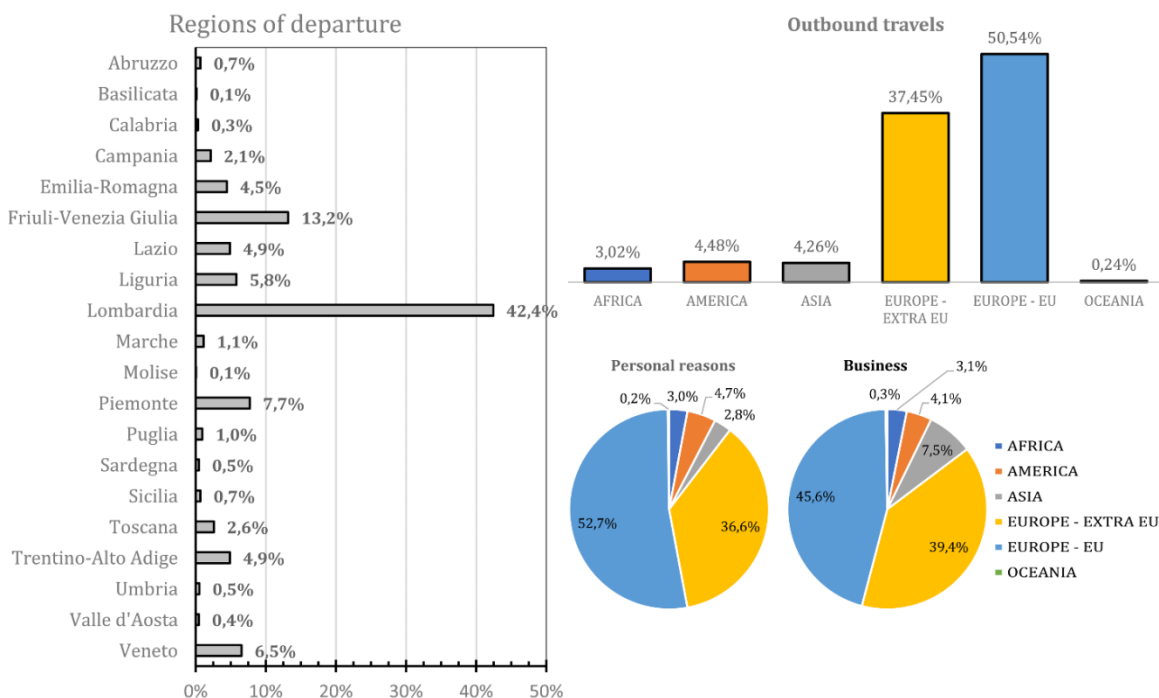
La Fig. 3.13 mostra infine, per i soli turisti locali, la visualizzazione del numero di giorni che presentano una temperatura media percepita come confortevole, compresa quindi nell'intervallo ($22.1^{\circ}\text{C} \div 27.2^{\circ}\text{C}$) [26]. Emerge che le zone con il maggior numero di tali giorni risultano essere quelle costiere. Da questo punto di vista non deve trarre in inganno il fatto che sono le stesse zone che in estate portano alle sollecitazioni termiche maggiori. Bisogna infatti considerare che tali zone, come detto in precedenza, possono divenire estremamente confortevoli in inverno e durante le stagioni intermedie.

3.5. La percezione termica di un individuo adattato al clima mediterraneo nei vari continenti

3.5.1. Caratteristiche degli spostamenti della popolazione italiana verso altre nazioni

Nel 2013 gli italiani che si sono recati in destinazioni diverse dal proprio comune di residenza, effettuando almeno un pernottamento, sono stati il 57.4% (su un totale di circa 60 milioni di residenti). Di questi, il 28% dei viaggi ha interessato destinazioni collocate oltre i confini nazionali. Pertanto le persone che hanno compiuto viaggi all'estero sono state circa 9.7 milioni. Risulta poi utile fornire un quadro complessivo che delinei la località di partenza, quella di arrivo ed il motivo per il quale vengono effettuati tali spostamenti [184,191]. Nella Fig. 3.14 sono state quindi riportate le percentuali sul totale dei viaggi all'estero in funzione delle regioni italiane di partenza, le percentuali in funzione dei continenti di destinazione e le percentuali in funzione della motivazione.

Figura 3.14. Turismo dall'Italia verso l'estero. Dati statistici relativi all'anno 2014 [184]



3.5.2. I dati meteorologici adoperati

Per procedere all'analisi della percezione termica, è stato necessario processare i dati meteo di un numero adeguato di siti collocati nei vari continenti. A tal fine sono stati utilizzati i dati che il software Energy Plus impiega per simulazioni di tipo energetico. È stato quindi creato un database con circa 2,350 località collocate nei continenti abitati (Europa, Asia, Africa, Nord e Centro-Sud America, Oceania) e ciò ha permesso di ottenere una griglia di punti piuttosto fitta, specialmente nelle porzioni più densamente antropizzate del pianeta. Con cadenza oraria e con riferimento ad un anno tipo, sono stati poi acquisiti per ogni luogo i valori delle seguenti grandezze meteorologiche:

- temperatura dell'aria a 2 m dal suolo (T_A) [$^{\circ}\text{C}$];
- umidità relativa (RH) [%];
- velocità del vento al livello del suolo (WS) (m s^{-1});
- radiazione solare totale al suolo, ottenuta grazie ai contributi di radiazione diretta, diffusa e riflessa ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$).

Va inoltre precisato che sono stati esaminati tali dati meteo solo durante il periodo diurno (nello specifico tra le ore 8.00 e le ore 22.00). Tale scelta è stata fatta per valutare l'outdoor thermal comfort durante quelle ore del giorno in cui vengono svolte con maggiore frequenza attività all'aperto [188]. La temperatura media radiante è stata infine calcolata in accordo alla metodologia illustrata nella sottosezione 3.2.3.

3.6. Risultati

I risultati vengono preliminarmente riportati per 6 città (Tab. 3.4), una per ciascun continente analizzato (Europa, Asia, Africa, Nord e Centro-Sud America, Oceania). La scelta è stata fatta in accordo con la graduatoria per il 2015 delle "Top 100 City Destinations Ranking" [192].

Tabella 3.4. Città scelte per l'analisi specifica dei dati.

City	Hong Kong	London	New York	Lima	Johannesburg	Sydney
Country	China	UK	US	Peru	South Africa	Australia
Continent	Asia	Europe	North America	South America	Africa	Oceania
Ranking*	1	3	9	76	37	59
Annual arrivals* (10^3)	26,686.0	18,580.0	12,300.0	2,488.3	4,872.3	3,194.9
Latitude	22°17' N	51°30' N	40°42' N	12°2' S	26°12' S	33°52' S
Longitude	114°9' E	0°7' W	74° W	77°1' W	28°2' E	151°12' E
Elevation (m)	6	35	10	1,550	1,753	58
Koppen classification**	Cwa	Cfb	Cfa	Bwh	Cwb	Cfa

* [192] - ** [24]

Con riferimento al calcolo del MOCI, in Tab. 3.5 vengono poi riassunti i valori medi stagionali, il valore minimo e massimo delle medie settimanali durante tutto l'anno ed il numero di giorni di comfort termico durante l'anno tipo.

Tabella 3.5. Riassunto dei risultati ottenuti per le città analizzate.

MOCI	Seasonal Averages				Weekly Averages		Thermal Comfort N° Of Day
	Spring	Summer	Autumn	Winter	Min	Max	
Hong Kong	0.332	0.772	0.235	-0.169	-0.5	1.4	207
London	-0.482	-0.011	-1.007	-1.322	-1.5	0.6	101
New York	0.170	0.609	-0.618	-1.112	-1.5	1.0	127
Lima	0.060	-0.380	-0.087	0.312	-0.6	0.6	268
Johannesburg	-0.004	-0.090	0.223	0.593	-0.6	0.9	238
Sydney	0.015	-0.321	0.451	0.678	-0.7	1.2	194

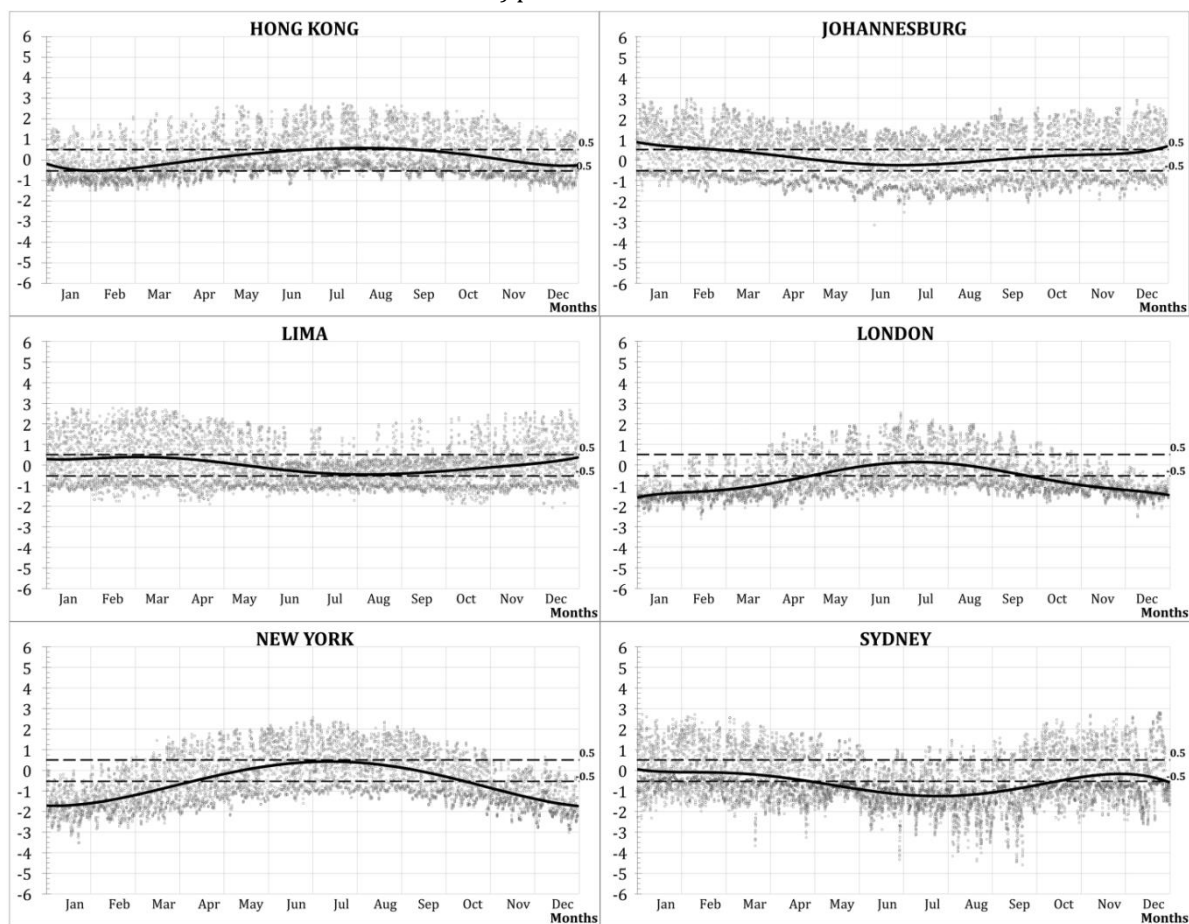
Dai valori medi stagionali, si può notare come Lima sia la città in cui i valori del MOCI ricadono più frequentemente nell'intervallo $(-0.5 \div 0.5)$, che può essere considerato quello di benessere. Seguono le città di Hong Kong (dove l'estate risulta calda), Johannesburg e Sydney (dove invece gli inverni risultano freddi). Londra presenta una primavera ed un'estate percepite come stagioni mediamente piacevoli mentre New York risulta gradevole solo in primavera. Per queste città vengono inoltre fornite informazioni temporali più dettagliate, grazie a grafici basati sulla valutazione di dati orari e medi settimanali.

Le 2,350 città analizzate saranno poi classificate in 13 diverse categorie sulla base del livello di comfort medio stagionale. E' stato infine possibile costruire mappe spaziali che riportano i valori del MOCI sull'intero globo terrestre attraverso i valori medi stagionali.

3.6.1. Distribuzione annuale oraria e settimanale delle varie grandezze

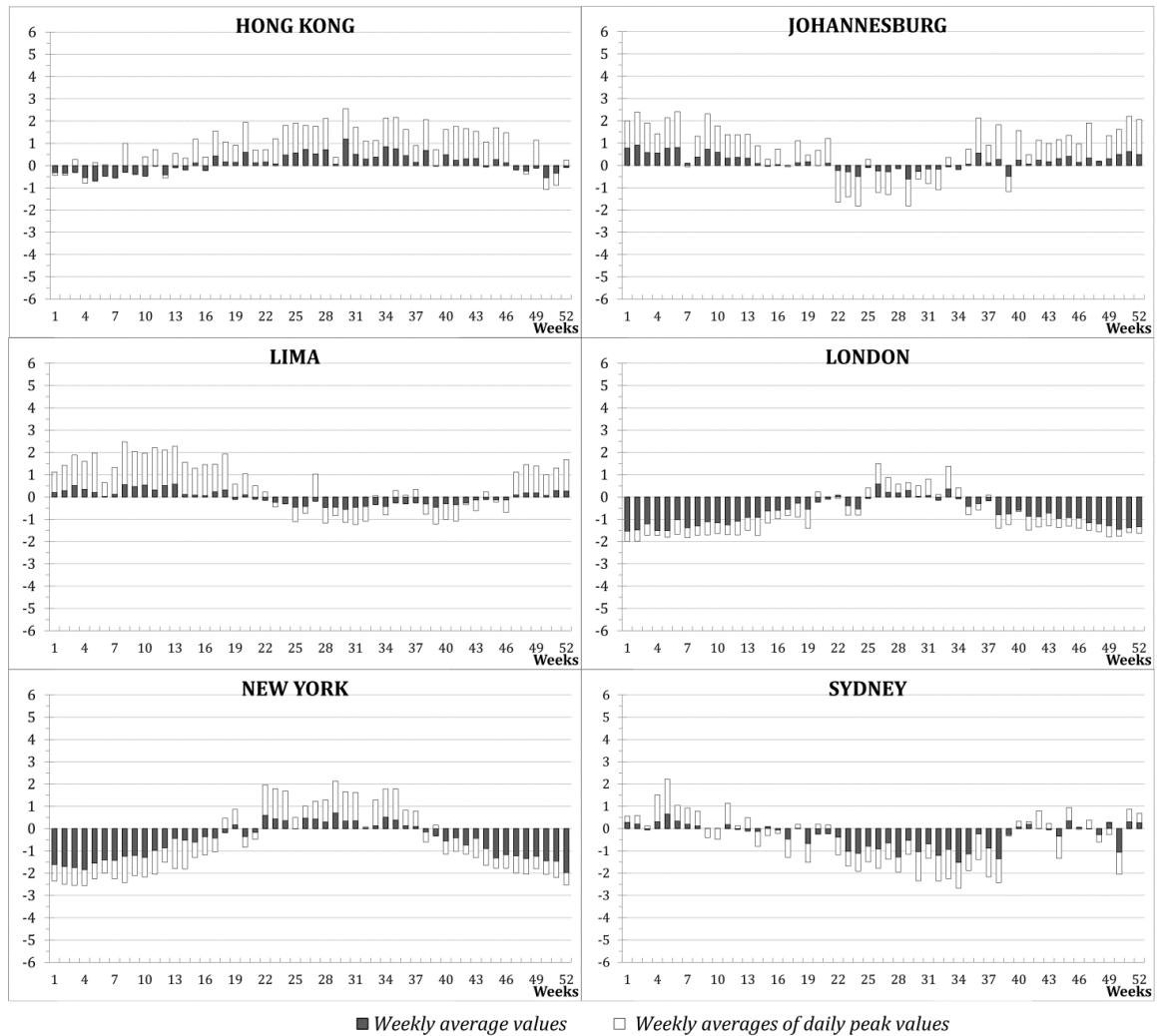
Per ciascuna delle località in cui sono stati acquisiti i dati meteorologici è stato calcolato con cadenza oraria il valore dell'indicatore MOCI tra le ore 8.00 e le 22.00. Vengono quindi riportati in Fig. 3.15 i grafici con gli andamenti annuali relativamente alle città indicate in Tab. 3.4. In tali grafici sono state riportate due linee tratteggiate a guisa di individuare il range dei valori considerati di benessere [26] mentre è stata rappresentata con una linea continua il valor medio.

Figura 3.15. Andamento orario annuale della percezione termica sulla base del MOCI (tra le ore 8.00 e le ore 22.00) per le città analizzate.



Dall'elaborazione di tali valori orari sono stati poi calcolati i valori medi settimanali del MOCI. In Fig. 3.16 sono stati riportati in grigio scuro i valori medi settimanali ed in chiaro la media settimanale dei picchi giornalieri di tale grandezza.

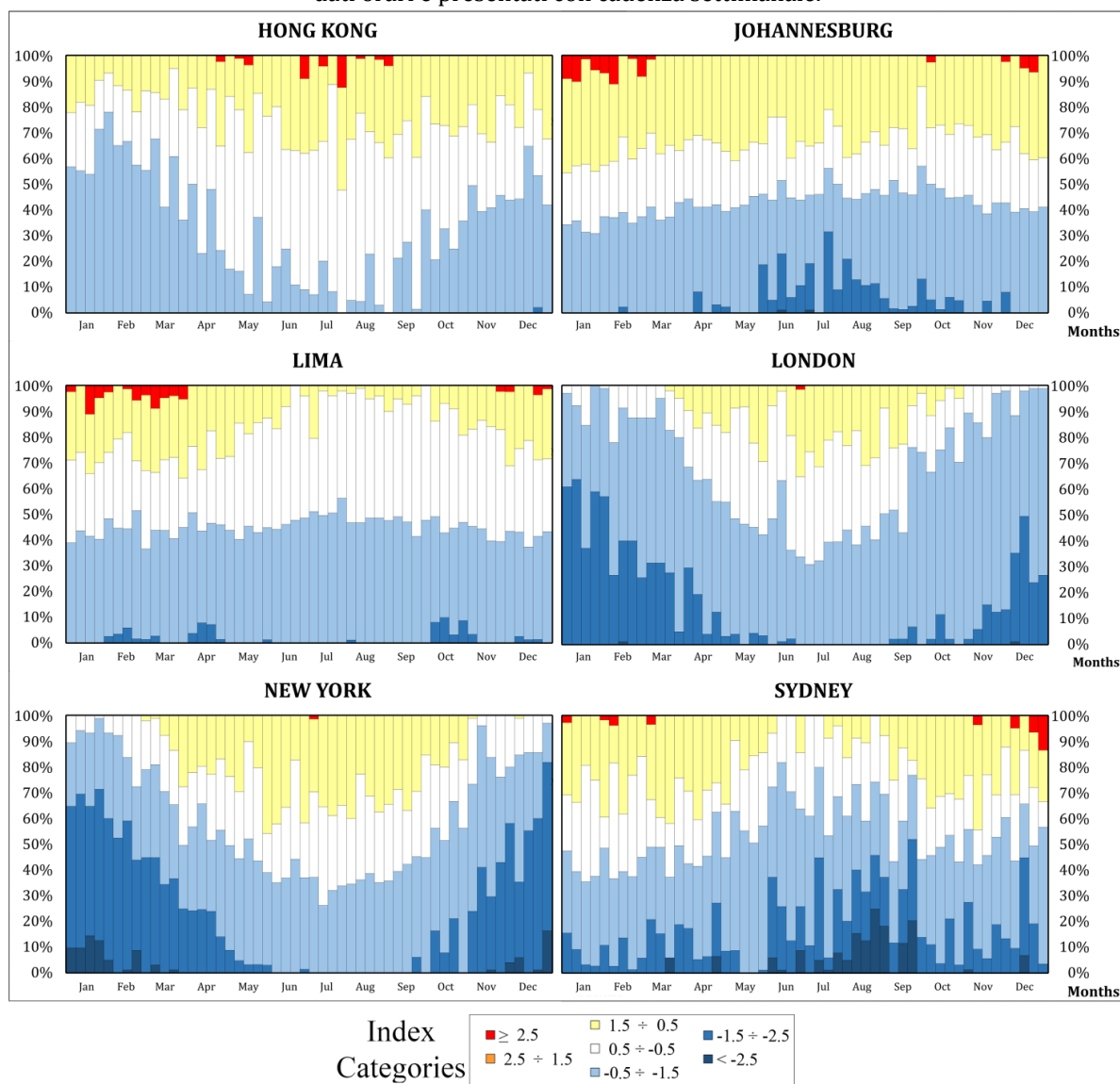
Figura 3.16. Valori medi settimanali e relative medie dei picchi giornalieri durante l'intero anno valutati attraverso il MOCI per le città analizzate.



3.6.2. Frequenze relative alla percezione termica e percentili

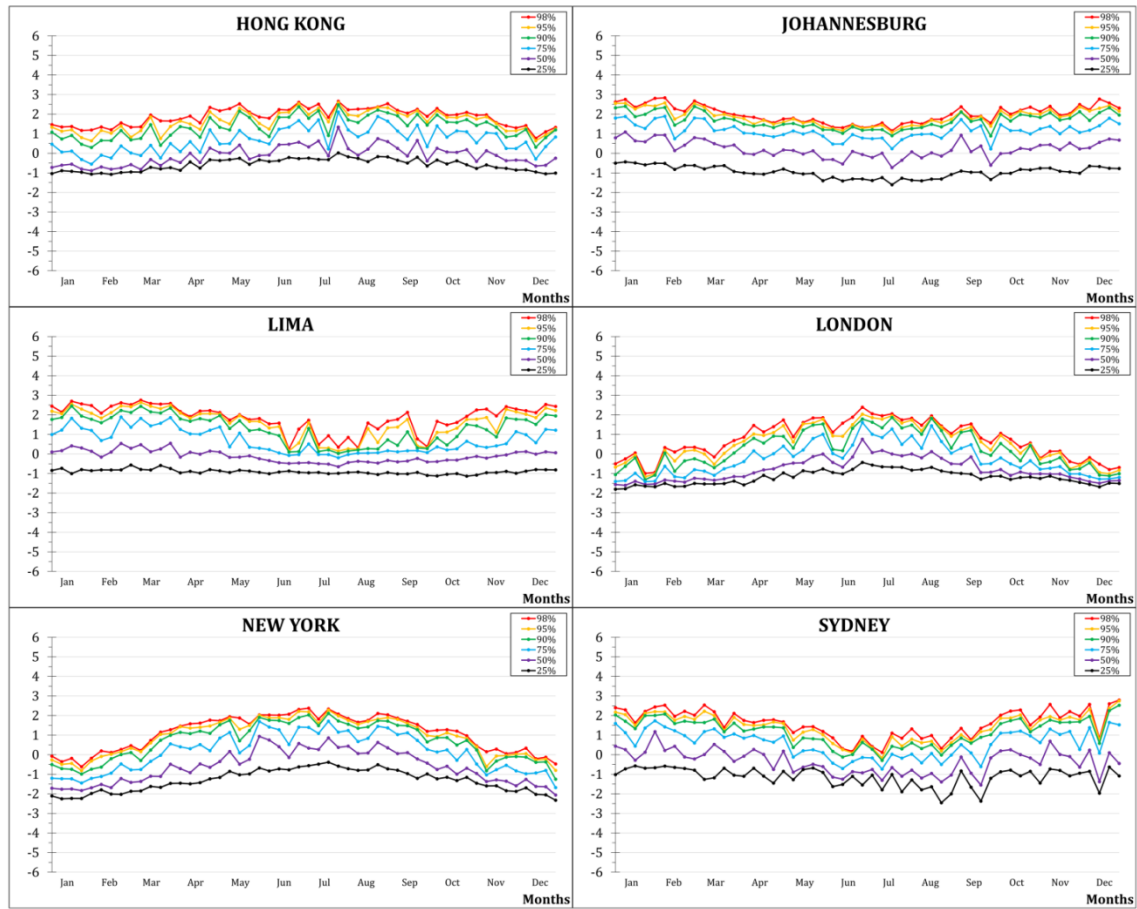
Dall'elaborazione di tali dati è stato possibile costruire i diagrammi di frequenza relativi alle città esaminate e, a tal fine, la scala di valori del MOCI è stata suddivisa in intervalli (Fig. 3.17). Questi diagrammi aiutano a capire in che misura gli eventi meteorologici che si verificano caratterizzano i diversi mesi dell'anno ed a valutare le possibilità, per un individuo mediterraneo, di trovare condizioni di comfort.

Figura 3.17. Diagrammi di frequenza relativi al MOCI nelle città analizzate. I valori sono calcolati sulla base di dati orari e presentati con cadenza settimanale.



In Fig. 3.18 vengono poi riportati i diagrammi che mostrano i percentili rappresentativi delle frequenze con cui si manifestano i valori dell'indicatore MOCI.

Figura 3.18. Variazioni nei percentili del MOCI con riferimento alle città analizzate.

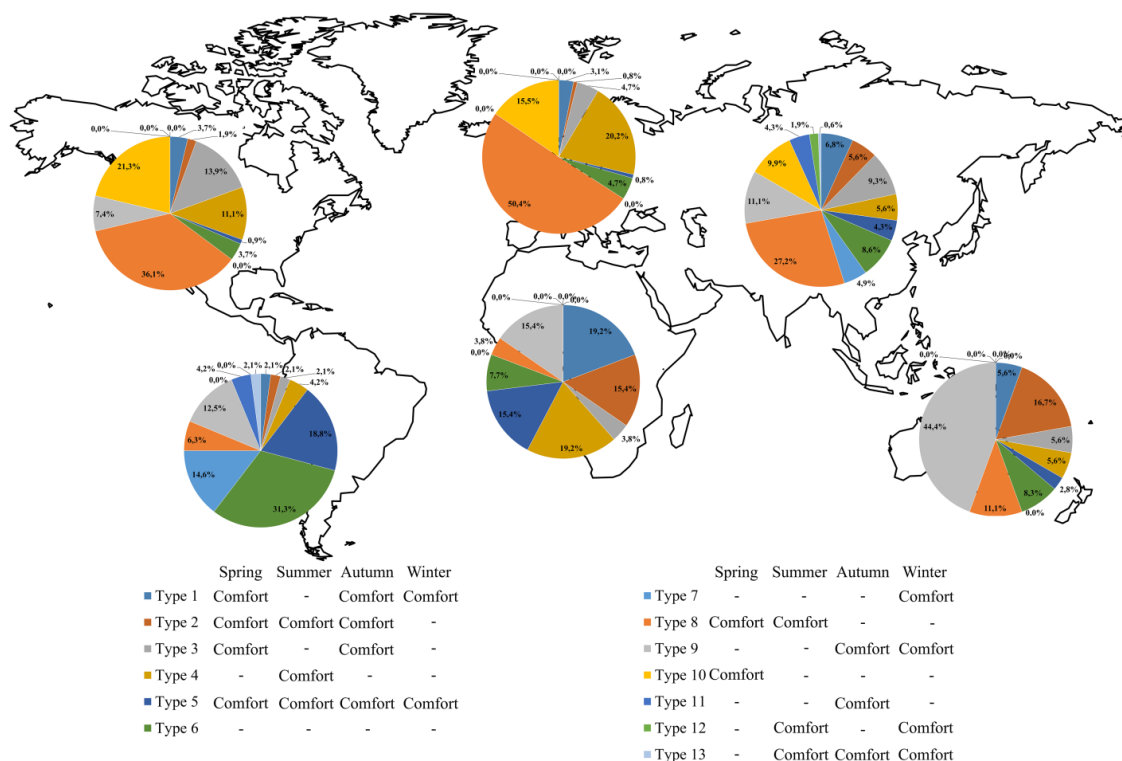


3.6.3. Classificazione delle località in funzione delle condizioni di comfort stagionale

In un precedente lavoro scientifico [188], gli autori hanno individuato quattro diversi tipi di città in funzione della percezione termica media stagionale per le zone orientali della Cina.

In questo studio è stato invece possibile determinare, nei continenti analizzati ed attraverso il MOCI, fino a tredici diverse tipologie di località. In Fig. 3.19 vengono quindi fornite per ogni continente le percentuali rappresentative del numero di città che ricadono in ciascuna categoria.

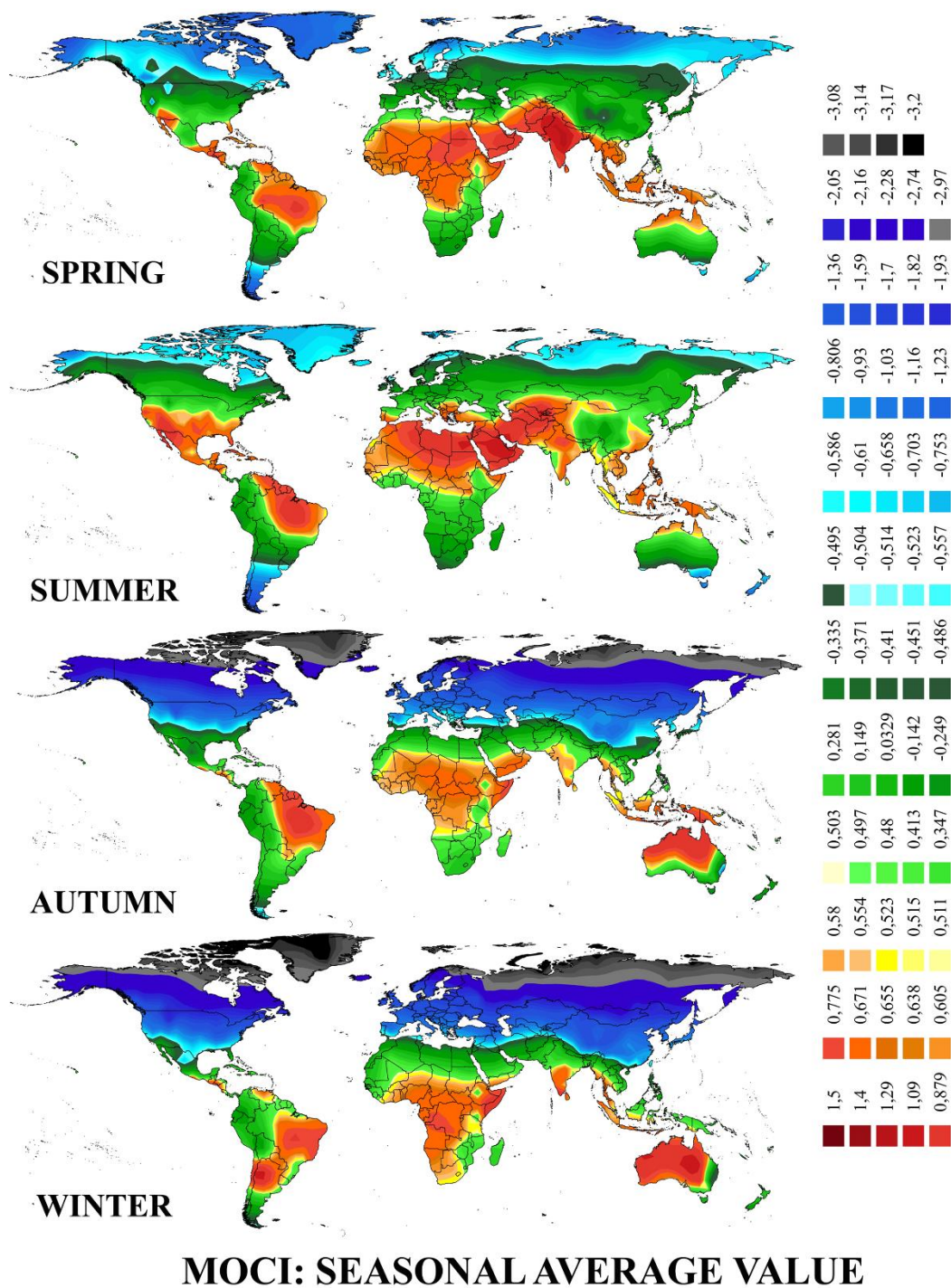
Figura 3.19. Percentuali per ciascun continente delle tipologie delle località analizzate in funzione del comfort medio stagionale.



3.6.4. Mappe spaziali stagionali

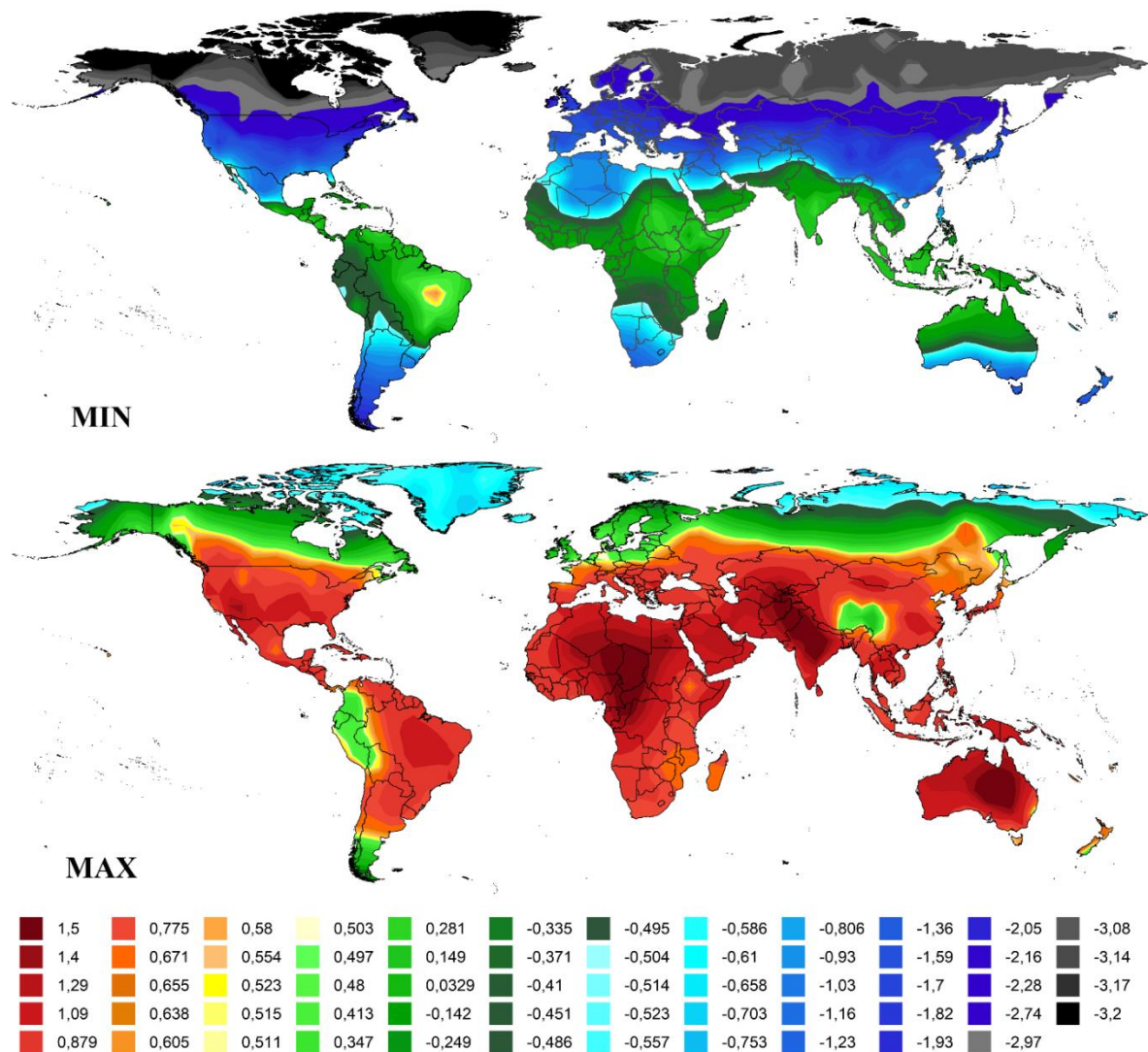
Grazie ai dati elaborati per ciascuna delle località analizzate, è stato possibile creare delle mappe (Fig. 3.20) che mostrano il valore medio stagionale del MOCI. I dati spaziali intermedi tra una località/nodo ed un'altra sono stati calcolati tramite una Gaussian process regression e l'interpolazione è stata possibile grazie alla metodologia kriging [190].

Figura 3.20. Mappe spaziali delle medie stagionali del MOCI per tutti i continenti abitati.



La Fig. 3.21 rappresenta i valori estremi (minimi e massimi) delle medie settimanali del MOCI in tutto il globo, indipendentemente dalla loro contemporaneità. Queste mappe mostrano per ogni zona del pianeta i picchi di “massimo freddo” e di “massimo caldo”, al fine di capire quanto queste condizioni possano risultare gravose per un normotipo mediterraneo.

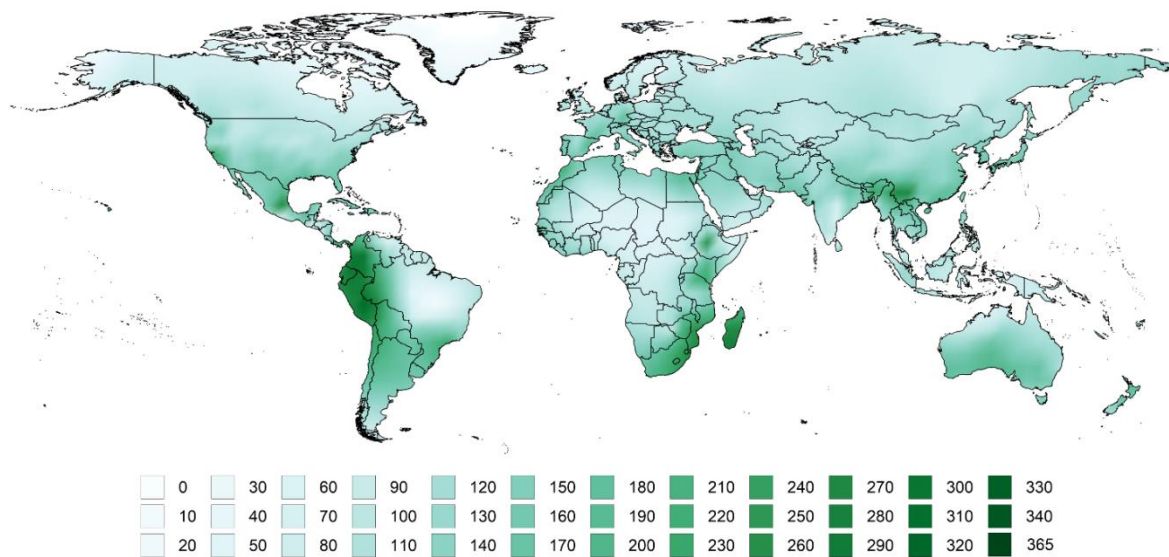
Figura 3.21. Mappe spaziali dei valori estremi (non contemporanei) delle medie settimanali per il MOCI per tutti i continenti abitati durante l'intero anno.



MOCI: Average weekly value

Viene infine riportata in Fig. 3.22 la mappa spaziale che rappresenta la somma dei giorni dell'anno in cui il valore medio del MOCI ricade nell'intervallo di benessere $(-0.5) \div (+0.5)$.

Figura 3.22. Mappa spaziale rappresentante il numero di giorni in cui il valor medio del MOCI ricade nell'intervallo di benessere.



MOCI: N° of day without thermal stress

3.7. Discussioni

3.7.1. Analisi temporale nelle località studiate

In linea con studi recenti [193], i dati sono stati analizzati settimanalmente e ciò ha permesso di ottenere informazioni più dettagliate rispetto a quanto fatto in ricerche precedenti che basavano i loro calcoli su decenni [35,188]. Inoltre il calcolo dell'indicatore MOCI è stato effettuato tra le 8.00 e le 22.00, orari in cui gli spazi outdoor sono di solito maggiormente utilizzati. Valori basati su medie settimanali non consentono però di apprezzare i picchi assoluti ed è per tale ragione che sono stati riportati anche i valori medi degli estremi settimanali (Fig. 3.16).

I risultati riassunti nelle Figs. 3.16-3.18 mostrano come città afferenti a luoghi molto distanti da quelli di origine, e quindi a zone climatiche diverse da quelle di abituale permanenza, sottopongono l'individuo mediterraneo a sollecitazioni termiche differenti da quelle a cui lo stesso è abituato, anche a parità di periodo dell'anno analizzato. Sebbene l'appartenenza dei luoghi di destinazione all'emisfero australe o boreale inverta totalmente la percezione stagionale, risulta interessante notare la sollecitazione a cui l'individuo è sottoposto (la cui misura è il valore in modulo del MOCI). Ad esempio, dalla Fig. 3.16 si può notare come una città quale New York (pur essendo nel medesimo emisfero ed a latitudini simili rispetto all'area mediterranea) comporta stress termici superiori a quelli di città ben più lontane dai luoghi di origine del normotipo mediterraneo. Con riferimento all'intero anno, è poi possibile notare come il periodo di comfort termico risulta essere piuttosto breve. La situazione inversa si verifica invece per la città di Lima che, grazie alla sua altitudine sul livello del mare, è caratterizzata da un clima più piacevole nonostante la vicinanza all'Equatore. Lunghi periodi percepiti come freddi o molto freddi caratterizzano poi la città di Londra: essa mostra infatti solo un periodo che può essere considerato piacevole tra la 25esima e la 34esima settimana dell'anno. New York, come delineato in precedenza per la capitale inglese, risulta essere caratterizzata da valori negativi del MOCI (corrispondenti a sensazioni di freddo) con valori medi piuttosto

sto elevati in termini di modulo. Ciò può comportare, per l'individuo mediterraneo, la necessità di indossare, anche durante le stagioni intermedie, abiti caratterizzati da una elevata resistenza termica (unica variabile operativa che compare nella formulazione analitica del MOCI e quindi manipolabile dal soggetto). Il vestiario risulterebbe quindi ben più pesante di quello indossato nel medesimo periodo dell'anno nei luoghi di provenienza.

Il confronto tra Sidney e Johannesburg, pur essendo entrambe località appartenenti all'emisfero australe, mostra un periodo caldo caratterizzato da valori massimi meno marcati per la città sud africana. Questo rende Johannesburg una città con un clima mediamente più gradevole ed accettabile da parte di un individuo mediterraneo che vi si reca per brevi periodi. Bisogna tuttavia considerare che l'inversione delle stagioni rende comunque problematico l'acclimatamento del viaggiatore che passa da una stagione fredda ad una calda (e viceversa, a seconda del periodo dell'anno in cui il viaggio viene intrapreso) dovuto al cambio di emisfero.

Dalla Fig. 3.17 si può poi dedurre che la frequenza con cui si manifestano settimanalmente gli eventi analizzati rende piacevole la permanenza in una città come Lima durante tutto l'anno, con un'ampia zona in cui i valori del MOCI sono compresi tra -0.5 e +0.5 e con poche settimane caratterizzate da eventi estremi. Un discorso analogo può essere fatto per Hong Kong mentre New York, Londra e Sidney mostrano grafici caratterizzati da valori medi settimanali che spesso figurano al di fuori della fascia di neutralità termica.

In Fig. 3.18 sono mostrati, attraverso i percentili, quanto siano frequenti i valori del MOCI durante ogni settimana dell'anno. Le condizioni che risultano essere di maggior interesse sono quelle che associano a percentili maggiori del 75% valori del MOCI compresi nell'intervallo di benessere (tra -0.5 e +0.5). Anche in questo caso i grafici sottolineano la bontà del clima di Lima tra le città analizzate.

È inoltre interessante vedere come, per ciascun continente, risultano percentualmente classificabili le città analizzate in funzione di quelle stagioni in cui il valor medio del MOCI è compreso tra -0.5 e +0.5. Tale classificazione è stata in parte mutuata e poi ulteriormente sviluppata da un precedente studio [194], che ha focalizzato la sua attenzione su varie località cinesi implementando l'indice PET (Physiological Equivalent Temperature). È però interessante notare come in questo studio, caratterizzato da un'area di analisi molto maggiore, sono state rilevate 13 tipologie di località (contro le sole 4 tipologie determinate da Lin [194]). Se si focalizza poi l'attenzione su quelle località che presentano per il normotipo studiato tutte stagioni confortevoli ("Type 5" in Fig. 3.19), è possibile vedere come il continente con la percentuale maggiore è l'America del Sud. Va però sottolineato che questo continente è anche quello con il maggiore numero percentuale di città in cui non si manifesta mai una stagione mediamente confortevole. Per i continenti appartenenti all'emisfero boreale, si manifestano percentuali più elevate della tipologia di luoghi ricadenti nel "Type 8" (comfort in primavera ed estate). L'Oceania in particolare mostra una prevalenza di località caratterizzate da condizioni confortevoli in autunno e inverno ("Type 9") mentre l'Africa vede un elevato numero di siti con condizioni confortevoli in primavera, autunno e inverno ("Type 1").

3.7.2. Analisi delle mappe spaziali

Nelle mappe riportate dalla Fig. 3.20 alla Fig. 3.22 è possibile visualizzare, per l'intero globo, i valori medi stagionali dell'indicatore MOCI. Essi limano molto i valori estremali che si manifestano con cadenza oraria al variare delle condizioni metereologiche, ma permettono comunque di capire quelle che sono le condizioni che un individuo mediterraneo incontrerà spostandosi velocemente dai propri luoghi di origine verso territori climaticamente lontani e diversi.

Dalle mappe rappresentate in Fig. 3.20, è possibile vedere come, a parità di stagione, esistano località con condizioni molto diverse. Il valore in modulo del MOCI indica che il clima di alcuni luoghi risulta troppo estremo per riuscire a svolgere un trasferimento senza acclimatamento e senza attuare le giuste strategie in termini di variabili operative. Recarsi durante la stagione invernale dal bacino mediterraneo verso località nordiche può comportare condizioni di freddo difficilmente sopportabili da individui abituati alle condizioni delle categorie climatiche Cfa, Cfsa, Csa. Ovviamente un abbigliamento caratterizzato da elevata resistenza termica (maggiore di quella che si utilizzerebbe nei medesimi periodi nei luoghi di origine) può facilitare la permanenza in ambiente esterno. Questo ragionamento non è invece attuabile negli spostamenti verso luoghi considerati caldi durante il manifestarsi stagionale dei valori apicali. Gli individui mediterranei che si spostano verso zone equatoriali potrebbero infatti sperimentare sensazioni di discomfort in grado di portare anche a gravi problemi di salute [3]. Esulano da questo ragionamento quei luoghi che, sebbene posti lungo l'equatore, risultano caratterizzati da un'orografia tale per cui il loro territorio si trova a quote elevate sul livello del mare. Per capire quindi con quale intensità si manifestino i valori apicali dell'indicatore MOCI al variare della posizione spaziale, indipendentemente dal momento dell'anno in cui occorrono, sono state realizzate le mappe presenti in Fig. 3.21. È possibile notare come alcuni luoghi del pianeta siano particolarmente inospitali se visitati nei periodi di massimo valore medio stagionale dell'indicatore MOCI. Questo può anche spiegare il perché spesso tali luoghi siano scarsamente abitati e non abbiano mai consentito lo sviluppo di insediamenti umani popolosi.

La Fig. 3.22 fornisce indicazioni utili a determinare il numero di giorni in cui il valor medio del MOCI ricade all'interno dell'intervallo rappresentativo del benessere. Ovviamente la zona di origine mostra valori elevati legati all'adattamento degli individui al proprio clima. Interessante notare che zone territorialmente lontane possano comunque garantire un numero elevato di giorni confortevoli. Un esempio è la zona andina, che pur essendo collocata a latitudini equatoriali, si sviluppa su altopiani che conducono a condizioni di temperatura, irraggiamento, ventosità ed umidità tali da attenuare lo stress termico, rendendo quindi piacevole un soggiorno anche senza un lungo periodo di acclimatamento.

4. THERMAL COMFORT E TEMPERATURA DI COLORE DELLA LUCE: UN POSSIBILE CONTRIBUTO AL RISPARMIO ENERGETICO?

4.1. Introduzione

Gli impianti termici ed illuminotecnici sono attualmente tra le installazioni più importanti negli edifici. Indipendentemente dalla loro influenza sulle prestazioni degli utenti, il loro impatto in termini economici, energetici, ambientali e sociali risulta essere estremamente rilevante.

Con riferimento al settore non residenziale europeo, alcuni studi hanno stimato che i consumi energetici ammontano al 73% del totale per il riscaldamento, al 16% per la componentistica elettrica, al 6% per il raffrescamento ed al 5% per l'illuminazione [195][196]. In quest'ultimo caso va però detto che il progressivo aumento nell'uso di luce naturale [197][198][199] ed il crescente impiego della tecnologia LED [200] potrebbero condurre ad un decremento della suddetta percentuale. Sebbene un'errata interpretazione di questa tendenza potrebbe lasciar presupporre una diminuzione del peso relativo all'impiantistica illuminotecnica sui consumi e sui costi totali, la realtà è piuttosto differente. L'installazione di sorgenti luminose LED influenza infatti il livello di melatonina ed il rilascio di cortisolo, fattori sui quali si potrebbe agire per conseguire varie finalità. Alcuni studi mirano, per esempio, a sfruttare tali effetti per ottenere una diminuzione dei livelli di violenza tra gli spettatori di eventi sportivi [201] mentre altri aspirano ad un aumento dell'integrazione sociale nelle vittime di violenze di genere [202].

Data quindi la varietà di effetti derivanti dall'illuminazione che sono ancora lontani dall'essere pienamente compresi, potrebbe essere utile valutare se gli stessi possono essere sfruttati per diminuire i consumi energetici e l'impatto ambientale derivanti dagli impianti termici. Da questo punto di vista, differenti studi [203][204][205][206][207][208] sono stati effettuati per valutare l'influenza del colore sulla percezione termica delle persone e, conseguentemente, la cosiddetta hue-heat hypothesis [209]. Essa afferma che una luce od un colore caratterizzati da lunghezze d'onda collocate verso l'estremità rossa dello spettro visibile sono percepite come calde, mentre quelle con lunghezze d'onda verso l'estremità blu sono percepite come fredde. Conseguentemente, una luce con bassa temperatura di colore sarà descritta come calda mentre una con elevata temperatura di colore sarà individuata come fredda.

Occorre però dire che gli studi effettuati fino ad oggi sulla hue-heat hypothesis sono giunti a conclusioni contrastanti tra loro. Ho et al. [210] hanno ad esempio rilevato come oggetti o materiali blu sono percepiti come più caldi. La spiegazione potrebbe risiedere nel fatto che ci si aspetta che un oggetto blu sia più freddo di uno rosso e, nel momento in cui ci si accorge che provocano la stessa sensazione termica, si tende a sovrastimare la sua temperatura. Una conferma è stata ottenuta anche da Mogensen and English [211]. Essi hanno effettuato uno studio in cui i partecipanti dovevano stimare, tra due cilindri mantenuti alla temperatura di 42 °C, il più caldo. Ogni cilindro era però caratterizzato da un colore differente ed il verde ed il blu sono stati spesso percepiti come più caldi rispetto al rosso ed al viola. Il colore non riesce quindi a modificare l'effetto derivante dalle sensazioni di natura tattile. Kuno et al. [212] hanno poi studiato l'influenza del colore di tappeti e tendaggi. Essi hanno trovato come interni rossi conducono ad una percezione termica più calda a fronte di una temperatura crescente e ad una percezione termica più fredda con una temperatura decrescente. Altri studi hanno invece valutato l'influenza del colore delle pareti sul comfort termico e sulla perce-

zione della temperatura [207][213][214][215]. Itten [214] and Clark [213] hanno messo in luce come i partecipanti ai loro studi tendevano ad avvertire più freddo in stanze caratterizzate da una colorazione blu o verde. In altri casi non è tuttavia emerso alcun effetto derivante dal colore delle pareti o della stanza. Greene and Bell [207] and Pedersen [215] hanno chiesto ai partecipanti di stimare la temperatura delle test rooms in varie configurazioni senza però registrare differenze significative.

Houghten et al. [203] hanno studiato la percezione termica e la temperatura cutanea ed orale di due soggetti impegnati a guardare per 7 ore uno schermo illuminato da una luce rossa, blu o bianca. I risultati non hanno rivelato differenze in termini di thermal comfort ma occorre considerare le variazioni relative alla luminanza dello schermo. Inoltre nei vari casi non è stata definita la composizione spettrale.

Altri studi [204][205][206][208][216][217] sono stati invece effettuati con la finalità di valutare l'influenza del colore della luce sulla percezione termica e, più in generale, sul thermal comfort. Bennett and Rey [208] hanno ad esempio analizzato la possibilità di alterare la percezione termica attraverso occhiali colorati ma non hanno rilevato alcun effetto significativo. Come spiegato dagli stessi autori, la causa potrebbe risiedere nella "washed-out impression" dovuta agli stessi occhiali. Berry et al. [204] hanno invece utilizzato delle lampade fluorescenti e dei filtri colorati per fornire cinque diversi tipi di illuminazione ad una stanza. In ogni configurazione è stata poi aumentata la temperatura dell'aria ed è stato chiesto a venticinque intervistati di indicare quando cominciavano ad avvertire "uncomfortably warm". Tuttavia neanche in questo studio sono state riscontrate variazioni significative circa la percezione termica degli individui. La situazione è invece differente per la ricerca di Fanger et al. [205]. Essi hanno analizzato la percezione termica in una stanza illuminata con luce blu o rossa ed hanno quantificato la derivante differenza in 0.4 °C. Una conferma della hue-heat hypothesis è stata ottenuta anche da Albers et al. [206]. Essi hanno condotto un esperimento in condizioni realistiche nella cabina di un aereo e hanno trovato come la valutazione del thermal comfort, su una scala che va da 1 (molto freddo) a 7 (caldo), risulti essere 3.31 con luce gialla e 3.19 con luce blu. Hanno inoltre trovato che, illuminando l'ambiente con luce gialla, la temperatura dell'aria viene percepita 0.2 °C più alta. Risultati simili sono stati ottenuti da Winzen et al. [217]: con riferimento allo stesso ambiente di prova di Albers et al. [206], anch'essi hanno valutato l'influenza del colore della luce ed hanno rilevato come una tonalità gialla porti a percepire la temperatura dell'aria come più calda rispetto ad una blu. In particolare, considerando una scala che va da 1 (molto freddo) a 7 (molto caldo), essi hanno stimato una percezione termica media di 5.47 con luce gialla e di 2.57 con luce blu. Candas and Dufour [216] hanno poi rilevato una tendenza a preferire un certo tipo di illuminazione (e.g. blu) per cercare di compensare gli effetti derivanti dalla temperatura. In un ambiente leggermente caldo, hanno riscontrato un aumento del thermal comfort di 6 unità (considerando una scala che va da 0 a 100) illuminando l'ambiente con una temperatura di colore di 5000 K anziché 2700 K. Risultati similari sono stati ottenuti anche da Nakamura e Oki [218], i quali hanno confermato una certa tendenza da parte delle persone a preferire una temperatura di colore più alta in ambienti caldi e viceversa.

Va inoltre detto che l'utilizzo di una luce caratterizzata da un'elevata temperatura di colore comporta un decremento della temperatura interna del corpo. Esso è stato stimato in 0.2 °C da Mo-

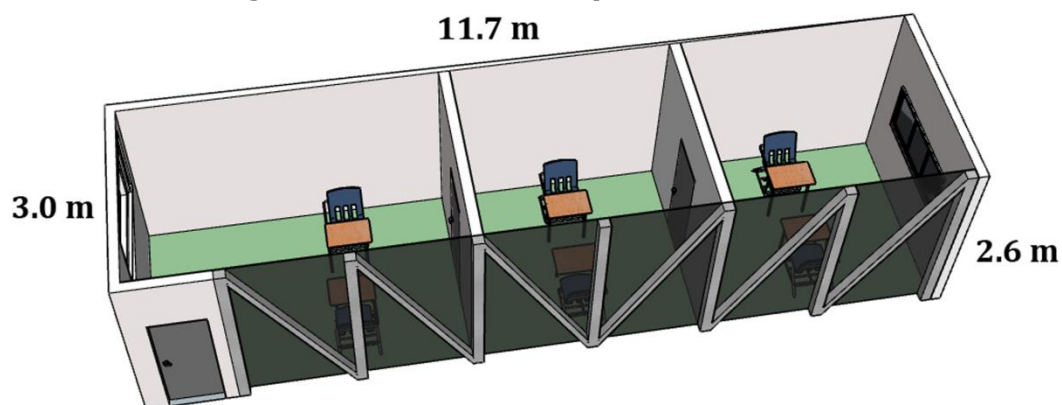
rita and Tokura [219] e da Cajochen [220] mentre è stato quantificato in $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ da Yasukouchi et al. [221] e da Shi [222]. Negli ultimi due studi gli effetti derivanti da una temperatura di colore di 3000 K sono stati comparati a quelli di una temperatura di colore di 5000 K e 7500 K [221] e di 6000 K [222] rispettivamente.

Tenendo conto di quanto detto, il presente studio (effettuato durante un periodo di studio e ricerca che il candidato ha trascorso presso la “Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos de la Universidad de Granada”) mira a valutare la possibilità di influenzare la percezione termica attraverso la temperatura di colore della luce con la finalità di variare la temperatura in ambiente interno. Per esempio, la temperatura di uno spazio confinato potrebbe essere inferiore in presenza di una luce con bassa temperatura di colore durante il riscaldamento e viceversa durante il raffrescamento, con conseguenti risparmi energetici. È stata conseguentemente organizzata, all’interno di una test room, una field survey in cui sono state esaminate la percezione e preferenza termica, la tolleranza e l’accettabilità personale e la confortevolezza nello svolgere un dato compito in presenza di luce calda, neutrale e fredda. L’influenza della tipologia di luce sul comfort termico è stata inoltre valutata attraverso il Friedman test ed il Wilcoxon Signed-Rank test. Il primo valuta l’esistenza di differenze tra le risposte date dai partecipanti alla presente survey a seguito dell’esposizione ai differenti tipi di luce mentre il secondo individua tra quali temperature di colore le eventuali suddette differenze intercorrono. L’influenza della temperatura di colore della luce è inoltre quantificata attraverso il test F parziale e la statistica t ed è numericamente comparata a quella di variabili quali genere, Body Mass Index (BMI), età e tasso metabolico. E’ stata poi effettuata una cross-tabulation analysis per comparare la percezione termica degli intervistati dopo l’esposizione a ciascuna tipologia di luce con quella precedente la prova e con quella predetta dal Predicted Mean Vote (PMV). La relazione di quest’ultimo indice di comfort termico è stata infine rielaborata in termini di derivate parziali. Ciò ha permesso di ottenere la variazione di temperatura dell’aria che è possibile effettuare senza alterare la percezione termica degli individui con ognuna delle tipologie di luce analizzate.

4.2. Set-up sperimentale

Lo studio è stato effettuato in una test room lunga 11.7 m, larga 3.0 m e caratterizzata da un’altezza di 2.6 m (Fig. 4.1).

Figura 4.1. Test room utilizzata per effettuare lo studio.



Il soffitto è di colore grigio chiaro mentre il pavimento è verde scuro ed hanno un coefficiente di riflessione del 60% e del 48% rispettivamente. Per quanto concerne le pareti verticali, tre sono bianche con un coefficiente di riflessione dell'80%. La quarta è invece costituita da una parete vetrata che permette ai ricercatori di supervisionare il corretto svolgimento dell'esperimento senza che il calore generato dal loro corpo vada ad influenzare la percezione termica dei partecipanti. Da questo punto di vista occorre ricordare che un individuo in piedi genera circa 70 W per m² di superficie cutanea [16]. La test room è stata poi suddivisa in 3 differenti ambienti separati. In ognuno di questi è stata collocata, ad un'altezza di 2.20 m, una data tipologia di lampada con l'obiettivo di esporre i partecipanti a configurazioni ambientali caratterizzate da luce calda, neutrale e fredda. Le temperature di colore delle varie lampade sono quindi 1,772 K, 4,024 K e 11,530 K rispettivamente ed in ogni ambiente sono state collocate due sedie con ribaltina per consentire ai partecipanti di assumere una posizione quanto più possibile comoda. Con riferimento al piano di lavoro, è stato quindi misurato di volta in volta il livello di illuminamento per essere certi che rispettasse i dettami della normativa. La norma EN 12464-1 [223] impone infatti un livello di illuminamento medio di 500 lux e suggerisce un coefficiente di uniformità maggiore o uguale a 0.7. Tali valori sono stati in ogni caso soddisfatti e, con riferimento al livello di illuminamento medio, sono stati calcolati i valori di 504.6 lux, 510.2 lux e 518.5 lux per luce calda, neutrale e fredda rispettivamente. Sebbene vi siano differenze relativamente ai valori calcolati, esse non sono in grado di apportare un effetto rilevante sulla percezione termica [224]. Sono state inoltre effettuate, nell'ambito di ciascuna prova, diverse misure sul piano di lavoro per essere certi che fosse soddisfatto anche il coefficiente di uniformità.

Per monitorare i valori assunti dalle variabili ambientali nella test room è stata poi adoperata una centralina microclimatica portatile. Ad essa sono state collegate quattro sonde:

- una termoresistenza al platino PT100 per misurare la temperatura dell'aria;
- un globotermometro con diametro di 150 mm e globo in rame nero opaco con coefficiente di riflessione minore del 2% per misurare la globe temperature;
- uno psicometro a ventilazione forzata con serbatoio in acqua distillata per misurare l'umidità relativa;
- un anemometro a filo caldo per misurare la velocità dell'aria.

Sfruttando la possibilità di regolare la centralina in altezza, esse sono state collocate ad un'altezza di 0.6 m. Ciò ha consentito di rilevare i valori delle variabili ambientali in corrispondenza dell'altezza del centro di gravità del corpo umano per individui seduti (come i partecipanti alla presente survey).

In Tab. 4.1 vengono quindi riportate le proprietà metrologiche della strumentazione adoperata.

Tabella 4.1. Proprietà metrologiche della strumentazione adoperata per misurare le variabili ambientali.

Sonda	Variabile misurata	Campo di misura	Risoluzione	Accuratezza
Termoresistenza al platino PT 100	T_A [°C]	-50 ÷ +80	0.01	±0.5 °C above -7 °C
Anemometro a filo caldo	WS [ms ⁻¹]	0 ÷ 45	0.01	±1 m/s
Psicrometro a ventilazione forzata	RH [%]	0 ÷ 100	0.1	±3 % (0-90 %), ±4 % (90-100 %)
Globotermometro	T_G [°C]	-40 ÷ 80	0.01	≤ 0.1 °C at 0 °C DIN 43760 1/3

Va poi specificato che per calcolare la temperatura media radiante è stata usata l'Eq. (37) [79]:

$$MRT = [(T_G + 273.15)^4 + (T_G - T_A) \cdot (1.1 \cdot 10^8 \cdot WS^{0.6}) / (\varepsilon \cdot D^{0.4})]^{0.25} \quad (37)$$

dove ε e D indicano rispettivamente l'emissività ed il diametro del globotermometro utilizzato.

4.3. Partecipanti alla field survey

Il campione investigato nel presente studio è costituito da 42 volontari (Tab. 4.2). La loro età varia tra 33 e 19 anni, con un valor medio di 23 ed una deviazione standard di 2.54. Con riferimento al genere, 24 sono uomini e 18 sono donne.

Tabella 4.2. Caratteristiche rappresentative del campione investigato.

	Age	Weight	Height	Body Mass Index	Metabolic rate
Maximum	33.00	120.00	1.92	40.09	115.00
Minimum	19.00	49.00	1.58	18.83	60.00
Mean	23.25	67.80	1.71	22.90	73.73
Mode	22.50	72.00	1.70	24.91	60.00
Median	22.50	64.00	1.70	22.55	60.00
Std. Deviation	2.54	14.45	0.08	3.76	21.87
25th percentile	22.50	57.50	1.65	20.29	60.00
75th percentile	22.50	77.50	1.76	24.91	70.00
Skewness	2.35	1.35	0.17	2.69	1.33
Kurtosis	6.13	3.01	-0.61	10.80	-0.07

La loro percezione del colore è stata preliminarmente valutata attraverso il test di Ishihara e tutti sono risultati idonei. Il tasso metabolico associato al singolo partecipante è stato poi determinato in accordo alla metodologia esposta nella sottosezione 1.3. Il Body Mass Index (BMI) (Eq. (38)) è stato invece determinato sulla base dell'altezza H e del peso W :

$$BMI = W/H^2 \quad (38)$$

I valori di W e H sono risultati utili anche nel computo della superficie cutanea (Eq. (8)). Il valore di tale superficie è necessario perché il Predicted Mean Vote (PMV), indice al quale i voti dati dagli intervistati sono comparati, è stato calcolato attraverso il software Rayman [85][177]. Esso richiede l'inserimento, come input parameters, del tasso metabolico M in Watt. Conseguentemente il valore ottenuto in W/m^2 mediante l'Eq. (38) è stato di volta in volta moltiplicato per la superficie cutanea del corrispondente intervistato.

E' stato poi preliminarmente chiesto agli intervistati di indossare, in occasione dell'esperimento, un vestiario standardizzato. Esso consisteva in un paio di pantaloni ed in una t-shirt. Nel caso delle donne era permesso indossare alternativamente, in luogo dei pantaloni, una gonna fino al ginocchio. Tale scelta è stata fatta per cercare di avere valori di isolamento termico del vestiario quanto più possibile simili: il primo caso riporta infatti un valore di 0.57 clo mentre il secondo di 0.54 clo ($1 \text{ clo} = 0.155 \text{ m}^2\text{KW}^{-1}$).

4.4. Il questionario

Il questionario adoperato in questo studio è stato strutturato in accordo con l'ISO 10551 [48]. Esso è stato scritto in linguaggio chiaro e semplice ed un intervistato impiega circa 90 s a compilarlo nella sua totalità. Esso è composto da tre parti: la prima ha lo scopo di acquisire informazioni personali come il genere, l'età, il peso, l'altezza, il vestiario e l'attività svolta trenta minuti prima di partecipare all'esperimento. Si chiede inoltre all'intervistato come è il suo stato di salute attuale e se vi fossero o meno sistemi di climatizzazione nell'ambiente in cui l'intervistato era prima di prendere parte alla prova.

La seconda parte del questionario, che l'intervistato deve compilare prima di essere esposto ad una luce con una data temperatura di colore, investiga invece la percezione e preferenza termica, la tolleranza e l'accettabilità personale e la confortevolezza nello svolgere la prova. In accordo con ISO 7730 [15], ASHRAE Standard 55-2004 [16] e con quanto fatto da Huebner et al. [224], la percezione termica viene valutata attraverso la cosiddetta ASHRAE 7-point scale (cold (-3), cool (-2), slightly cool (-1), neutral (0), slightly warm (+1), warm (+2) and hot (+3)). Per la preferenza termica è stata invece usata la McIntyre scale (cooler (-1), no change (0) and warmer (+1)) mentre la tolleranza personale è stata stimata sulla base di una 5-point scale che va da perfectly bearable (1) a unbearable (5).

La terza parte del questionario è infine identica alla seconda. E' stata però compilata dagli intervistati dopo che sono stati esposti per 30 minuti ad un dato tipo di luce. Ciò ha permesso di valutare la capacità della luce e della sua temperatura di colore di influenzare il thermal comfort.

Il questionario descritto è quello che ciascun intervistato ha compilato durante la prima delle tre prove caratterizzanti l'esperimento. Nell'ambito delle successive due, gli intervistati hanno dovuto compilare esclusivamente la seconda e la terza parte del questionario (evitando quindi la parte relativa alle informazioni personali).

I questionari sono stati scritti in spagnolo, che è la lingua di tutti i partecipanti. Tutti i questionari sono stati poi ricondotti agli individui che li hanno compilati ed ai valori misurati delle variabili ambientali attraverso un ID.

4.5. Procedura sperimentale

Al momento dell'arrivo dei vari partecipanti allo studio, il loro vestiario è stato controllato per essere certi che fosse conforme a quanto richiesto. In quei casi in cui sono state rilevate discrepanze tra quanto suggerito dai ricercatori e quanto indossato dai partecipanti, è stato chiesto a questi ultimi di rimuovere o di aggiungere singoli capi.

I partecipanti hanno poi firmato il modulo di consenso ed i ricercatori hanno presentato l'esperimento come uno studio finalizzato a valutare l'influenza di differenti condizioni ambientali

sul comfort termico. In accordo con quanto fatto da Huebner et al. [224], non sono state quindi menzionate condizioni specifiche.

Prima dell'inizio dell'esperimento, i partecipanti sono stati sottoposti ad un periodo preparatorio di 15 minuti in un ambiente collocato appena al di fuori della test room e caratterizzato dalle stesse condizioni in termini di temperatura ed illuminamento. Ciò ha permesso ai partecipanti di raggiungere un livello simile di tasso metabolico immediatamente prima della prova. Sono stati inoltre sottoposti all'Ishihara test per valutare la loro percezione del colore.

Successivamente essi sono stati introdotti due alla volta (eccezion fatta per due casi in cui l'intervistato ha sostenuto le prove singolarmente) nella test room e le varie prove sono state effettuate con una temperatura di circa 22 °C (valore medio=21.9 °C e deviazione standard= 0.3 °C).

Ai partecipanti è stato quindi chiesto di sedersi ed assumere la posizione più confortevole possibile per leggere 30 minuti. La tipologia di lettura è stata scelta dagli intervistati e supervisionata dai ricercatori. L'unica richiesta effettuata è stata quella di leggere su materiale cartaceo. Prima di essere esposti ad un dato tipo di luce, gli intervistati hanno poi compilato la prima e la seconda parte del questionario (Fig. 4.2).

Figura 4.2. Partecipante alla survey nell'atto di compilare un questionario.



Successivamente hanno letto per 30 minuti con una delle differenti tipologie di luce (calda, neutrale o fredda) ed hanno compilato la terza parte del questionario. Dopo di ciò, sono stati esposti 10 minuti ad una luce neutrale per neutralizzare gli effetti della prova precedente e poi 30 minuti ad una delle due restanti tipologie di luce. Anche in questo secondo caso sono state compilate la seconda e la terza parte del questionario. Il processo, comprensivo dei 10 minuti di esposizione ad una luce neutrale, è stato infine ripetuto per l'ultima temperatura di colore.

4.6. Risultati e discussioni

I risultati ottenuti nell'ambito della presente survey sono riportati in Tab. 4.3.

Tabella 4.3. Risultati derivanti dalle risposte date dagli intervistati relativamente a percezione e preferenza termica, tolleranza e accettabilità personale e confortevolezza nello svolgere la prova.

Thermal perception (Cold (-3), Cool (-2), Slightly cool (-1), Neutral (0), Slightly warm (+1), Warm (+2), Hot (+3))						
	1,772 K		4,024 K		11,530 K	
	Before the task	After the task	Before the task	After the task	Before the task	After the task
Mean Value	0.00	-0.08	-0.06	-0.22	-0.15	-0.59
Standard deviation	0.96	1.03	0.85	0.63	0.89	0.73
25 th percentile	0.00	-1.00	-1.00	-1.00	-0.50	-1.00
75 th percentile	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Thermal preference (Cooler (1), No change (2) Warmer (3))						
	1,772 K		4,024 K		11,530 K	
	Before the task	After the task	Before the task	After the task	Before the task	After the task
Mean Value	2.04	2.04	1.78	1.94	2.12	2.41
Standard deviation	0.52	0.65	0.53	0.52	0.51	0.49
25 th percentile	2.00	2.00	1.25	2.00	2.00	2.00
75 th percentile	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	3.00
Suitability of the task (Very comfortable (1), Comfortable (2), Neutral (3), Slightly uncomfortable (4), Very uncomfortable (5))						
	1,772 K		4,024 K		11,530 K	
Mean Value	2.44		1.72		2.12	
Standard deviation	0.89		0.65		0.76	
25 th percentile	2.00		1.00		2.00	
75 th percentile	3.00		2.00		3.00	
Personal acceptability						
	1,772 K		4,024 K		11,530 K	
	Before the task	After the task	Before the task	After the task	Before the task	After the task
Accept	81.5%	59.3%	94.5%	83.4%	88.9%	66.7%
Reject	18.5%	40.7%	5.5%	16.6%	11.1%	33.3%
Personal tolerance (Perfectly bearable (1), Slightly difficult to bear (2), Fairly difficult to bear (3), Very difficult to bear (4), Unbearable (5))						
	1,772 K		4,024 K		11,530 K	
	Before the task	After the task	Before the task	After the task	Before the task	After the task
Mean Value	1.35	1.42	1.28	1.22	1.26	1.48
Standard deviation	0.55	0.57	0.45	0.42	0.58	0.63
25 th percentile	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
75 th percentile	2.00	2.00	1.75	1.00	1.00	2.00

Con riferimento alla percezione termica degli intervistati dopo le varie prove, è possibile notare come intercorra una differenza di circa 0.50 unità tra i casi caratterizzati da luce fredda e luce calda. Ciò lascia presupporre una certa influenza sulla percezione termica da parte della tipologia di luce adoperata. E' però significativo come, nonostante le suddette differenze ed a fronte della temperatura dell'aria settata nella test room, i valori rilevati cadano sempre all'interno di quello che per l'ISO 7730 [15] è l'intervallo di comfort termico ((-1)-(1)). L'influenza della temperatura di colore della luce è poi confermata attraverso la preferenza termica degli intervistati. In questo caso sono stati

infatti riscontrati valori medi prossimi all'opzione di risposta "no change" sia per luce calda che neutrale. La situazione differisce invece per i voti dati a seguito dell'esposizione a luce fredda: il valor medio risultante è infatti 2.41 ed è sinonimo di una tendenza a richiedere condizioni termiche ambientali più calde. Va inoltre fatto notare come anche per la preferenza termica, così come per la percezione, i valori afferenti alla luce neutrale vadano a collocarsi in posizione intermedia e come siano piuttosto vicini ai valori associati alla temperatura di colore di 1,772 K. La situazione risulta invece essere differente se ad essere considerate sono l'accettabilità personale e la confortevolezza riscontrata nell'espletare il compito durante la prova. In questi casi infatti i risultati migliori continuano ad essere rilevati per la luce neutrale, seguiti però da quelli concernenti la luce fredda. Differenze non significative tra luce calda e fredda sono state infine rilevate in termini di tolleranza personale.

L'influenza della temperatura di colore della luce sul comfort termico è avvalorata anche da elaborazioni statistiche. Nell'ambito del presente studio, il Friedman test ha infatti riportato per χ^2 e p i valori di 3.694 e 0.158 rispettivamente. Essi risultano essere leggermente superiori rispetto a quanto riscontrato da Baniya et al. [225] per una temperatura dell'aria di 20 °C. Tali ricercatori hanno infatti preliminarmente comparato gli effetti di temperature di colore pari a 2,700 K, 4,000 K e 6,200 K ed hanno riportato i valori di $\chi^2=3.033$ e $p=0.219$. Gli stessi autori [225] hanno poi ripetuto l'esperimento a fronte di una temperatura dell'aria di 25 °C. In quest'ultimo caso l'influenza della temperatura di colore della luce ($\chi^2=8.456$, $p=0.015$) è risultata essere maggiore rispetto a quanto rilevato nel presente studio.

E' stata poi operata un'analisi attraverso il Wilcoxon Signed-Rank test per vedere tra quali temperature di colore intercorressero le suddette differenze. Essa ha messo in luce come le maggiori discrepanze sussistano tra la percezione termica degli intervistati con luce neutrale e quella con luce fredda ($Z=-2.066$, $p=0.039$). Discreti scostamenti riguardano anche il confronto tra luce calda e luce fredda ($Z=-1.758$, $p=0.079$) mentre sono poco rilevanti quelli calcolati prendendo in esame luce calda e neutrale ($Z=-0.372$, $p=0.710$). In quest'ultimo caso i risultati sono influenzati sia dalla vicinanza dei valori medi rilevati per la percezione termica che dalla deviazione standard riportata per la prova con luce calda. Quest'ultima, assumendo un valore più elevato rispetto a quello rilevato nelle altre due prove, comporta infatti una certa dispersione dei dati (che in alcuni casi vanno a sovrapporsi a quelli derivanti dall'esposizione a luce neutrale). Tali risultati confermano solo in parte quelli ottenuti da Baniya et al. [225]. Con riferimento alla temperatura di 25 °C, essi hanno riscontrato le maggiori differenze ($Z=-3.338$, $p<0.001$) in termini di comfort termico tra luce calda (2,700 K) e luce neutrale (4,000 K). Valori meno statisticamente significativi hanno invece riguardato il confronto tra le temperature di colore di 2,700 K e 6200 K ($Z=-1.436$, $p=0.151$) e tra 4,000 K e 6,200 K ($Z=-1.320$, $p=0.187$).

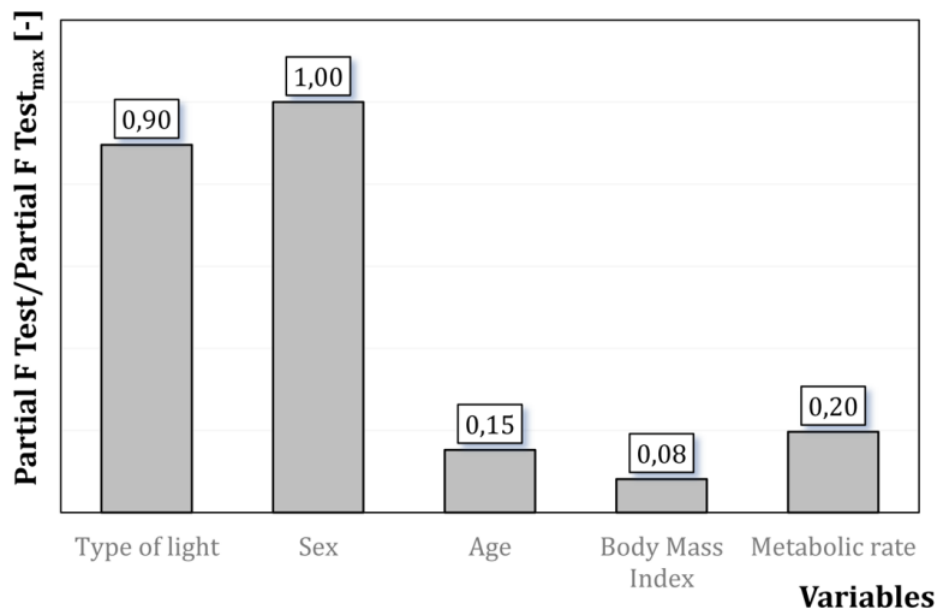
Nell'analisi dei risultati ottenuti, occorre inoltre considerare che, in accordo con Yasukouchi et al. [221], l'influenza della temperatura di colore della luce sulla percezione e sul comfort termico potrebbe aumentare con temperature dell'aria inferiori. Tale aspetto va però valutato in relazione al fatto che si tratta di spazi interni tipicamente destinati ad essere luoghi di lavoro e la temperatura dell'aria non può pertanto scendere al di sotto di un certo limite. Un altro fattore che può aver influenzato il giudizio dato dai partecipanti circa la percezione termica risiede nel tempo di esposizio-

ne ad un dato tipo di luce. In questo studio i partecipanti hanno infatti compilato in ogni caso i questionari dopo 30 minuti. Tale intervallo temporale concorre all'adattamento cromatico e ciò porta gli individui a percepire la luce sempre più come bianca piuttosto che rossa o blu [225]. Occorre poi considerare l'influenza correlata alla confortevolezza nell'espletamento dell'attività da parte degli intervistati. Alcuni ricercatori hanno messo in luce come i migliori voti in termini di percezione termica siano stati rilevati in corrispondenza della temperatura di colore favorita, evidenziando come questo fattore può aver pesato in misura maggiore rispetto alla preferenza termica [225]. Nell'ambito del presente studio, i voti migliori sono stati rilevati in corrispondenza della temperatura di colore neutrale, sia per la percezione termica che per la confortevolezza nello svolgere l'attività in esame. Occorre tuttavia evidenziare anche che la luce con temperatura di colore neutrale è quella a cui gli individui in questo caso sono maggiormente abituati ed anche ciò potrebbe aver pesato nei giudizi dati dagli intervistati.

Considerazioni interessanti possono essere fatte anche con riferimento all'influenza che alcune variabili esercitano sulla percezione termica degli individui a seguito dell'esposizione alle differenti tipologie di luce. Per approfondire tale aspetto, è stato implementato il test F parziale: esso permette di valutare quantitativamente il contributo che ciascuna variabile indipendente è in grado di dare ad un ipotetico modello sviluppato. Permette quindi di stimare quanto ogni variabile incide su quella dipendente (come detto in precedenza la percezione termica dopo lo svolgimento di ciascuna prova). Nel presente studio, una variabile risulta essere utile nella stima di quella indipendente se il valore assunto dal test F parziale è maggiore di 2.51, valore critico ottenuto attraverso la valutazione del 95th percentile della pdf di Fischer.

Il valore più elevato è stato ottenuto per il genere (5.47) ma è significativo come il secondo valore è stato riportato dalla tipologia di luce (4.39). Ciò emerge attraverso la Fig. 4.3, che mostra i valori del test F parziale normalizzati rispetto al valore massimo rilevato.

Figura 4.3. Valori del test F parziale normalizzati rispetto al valore massimo rilevato.



È inoltre possibile apprezzare come variabili quali il tasso metabolico, l'età ed il Body Mass Index condizionino in misura minore la percezione termica dei partecipanti dopo la prova. Ciò trova una conferma nella valutazione dei valori rilevati per la statistica t (Tab. 4.4).

Tabella 4.4. Valori riportati dalle variabili indipendenti esaminate per la statistica t.

t statistic				
Type of light	Sex	Age	Body Mass Index	Metabolic rate
2.10	-2.34	-0.36	-0.19	-0.46

Essa permette in questo caso di stabilire se esiste una relazione significativa tra le variabili esaminate e la percezione termica dopo l'esposizione alle varie tipologie di luce. In particolare, ciò accade se il valore relativo alla statistica t è al di fuori del range (-2.04)-(2.04), stabilito tramite il percentile (1- α)% relativo alla pdf di Student con un livello di significatività di 0.05 e 75 gradi di libertà.

Una volta appurata l'influenza della temperatura di colore della luce sulla percezione termica degli individui, vuole essere calcolata la possibile corrispondente variazione della temperatura dell'aria.

Per tale ragione è stata rielaborata la relazione per il Predicted Mean Vote (PMV) come segue (Eq. (39)):

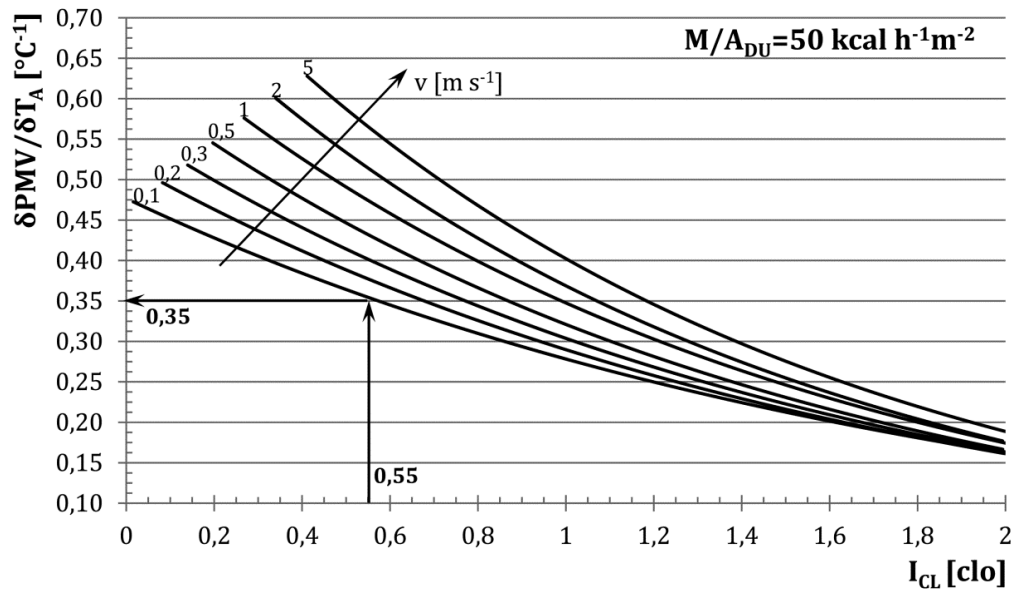
$$PMV = PMV_0 + \frac{\delta PMV}{\delta T_A} \cdot \Delta T_A + \frac{\delta PMV}{\delta MRT} \cdot \Delta MRT + \frac{\delta PMV}{\delta RH} \cdot \Delta RH \quad (39)$$

dove:

- PMV_0 è il valore del Predicted Mean Vote in una condizione di riferimento prossima a quella di neutralità ($PMV=0$);
- ΔT_A , ΔMRT e ΔRH sono le variazioni rispettivamente di temperatura dell'aria, temperatura media radiante ed umidità relativa;
- $\delta PMV/\delta T_A$, $\delta PMV/\delta MRT$ e $\delta PMV/\delta RH$ indicano le variazioni del Predicted Mean Vote derivanti da una variazione unitaria della grandezza di volta in volta riportata al denominatore.

Prendendo come esempio la prova che ha visto l'impiego di luce fredda, nell'Eq. (46) PMV_0 e PMV sono stati impostati pari a -0.15 e -0.59. Essi rappresentano, con riferimento all'ASHRAE 7-point scale, il voto medio dato dai partecipanti prima e dopo la prova rispettivamente. ΔMRT e ΔRH sono poi stati settati pari a 0 mentre $\delta PMV/\delta T_A$, uguale a 0.35, è stato ottenuto in accordo alla Fig. 4.4 [47]. Il valore dell'isolamento termico del vestiario (0.55 clo) è il valore medio calcolato sulla base di quelli riportati dagli intervistati ed è stato scelto in accordo allo standard ASHRAE 55-2004 [16]. La scelta di adoperare il grafico relativo al valore $M/A_{Du}=50 \text{ kcal}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$ deriva invece dal fatto che esso è il valore più vicino a quello medio rilevato nell'ambito del presente studio tra quelli categorizzati da Fanger ($50 \text{ kcal}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$, $100 \text{ kcal}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$ e $150 \text{ kcal}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$) [47].

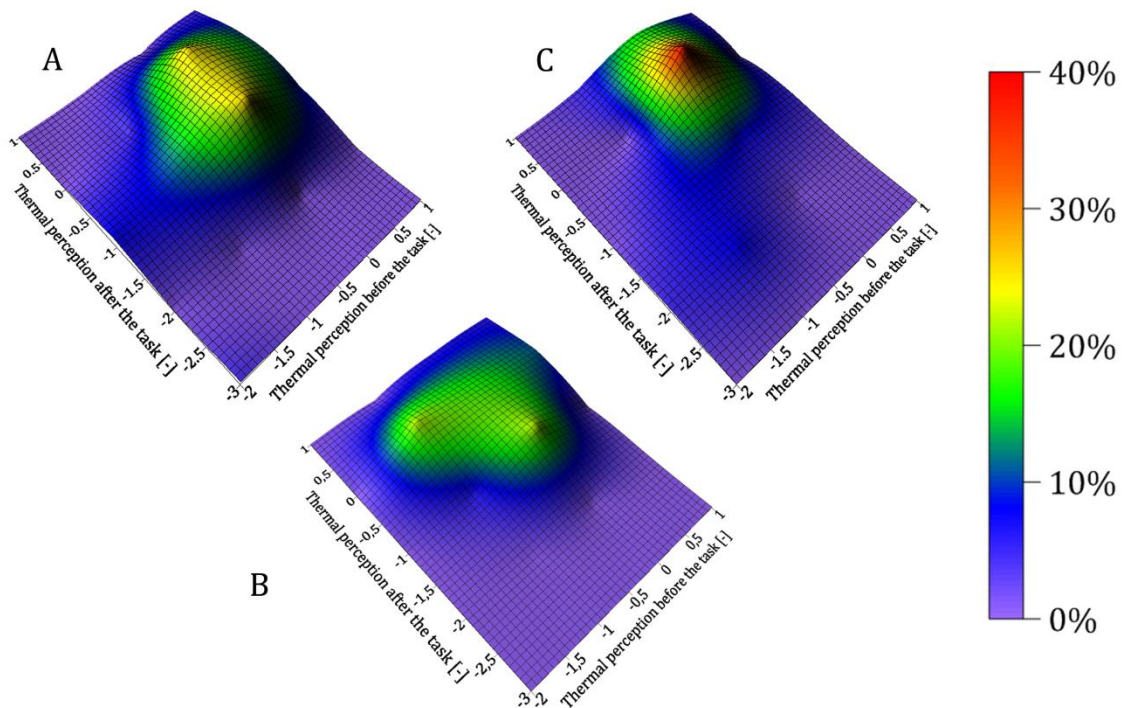
Figura 4.4. Determinazione del valore di $\delta PMV/\delta T_A$.



Sostituendo i valori sopra riportati nell'Eq. (46), si ottiene $|\Delta T_A|=1.25$ °C. In presenza di luce fredda, questo valore rappresenta l'incremento di temperatura che può essere imposto senza alterare la percezione termica degli individui. Con luce calda e neutrale, tale incremento può essere invece di 0.23 °C e 0.46 °C rispettivamente.

Tali considerazioni trovano una conferma valutando i voti relativi alla percezione termica dopo l'esposizione ai vari tipi di luce in funzione di quelli dati dai partecipanti prima della prova (Fig. 4.5).

Figura 4.5. Confronto tra i voti dati dagli intervistati con riferimento alla percezione termica prima e dopo l'esposizione a luce fredda (A), luce neutrale (B) e luce calda (C).



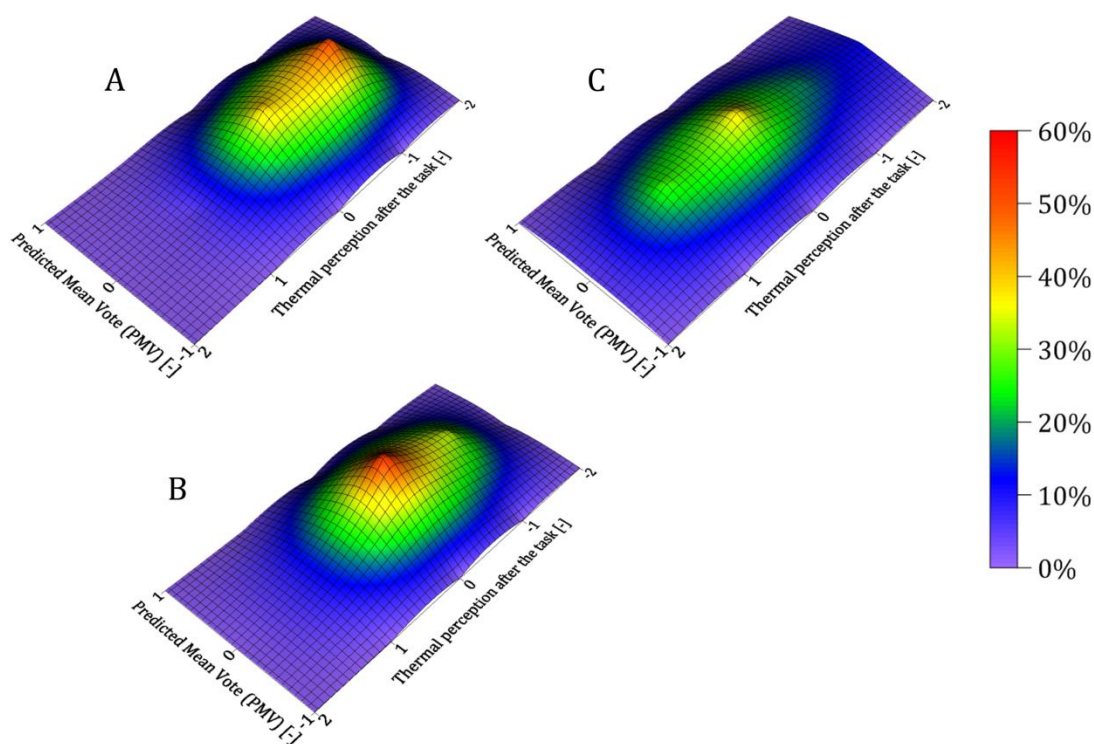
Con luce fredda, è ad esempio possibile notare come il suddetto incremento di temperatura sia possibile soprattutto grazie all'elevato numero di partecipanti che, dopo la prova, hanno cambiato da (0) a (-1) il loro thermal perception vote (26%). Significativo anche il numero di individui che, dopo aver espresso un voto preliminare di (1), ha giudicato la propria percezione termica con i voti (-1) e (0) (con riferimento al numero totale di intervistati, 7.5% e 11% rispettivamente).

Se invece viene presa in considerazione la luce neutrale, una percentuale considerevole è stata rilevata per coloro che hanno diminuito il loro voto da (0) a (-1) (22%) e da (1) a (0) (11.1%). Va però detto che i risultati sono mitigati dal fatto che il 22.2% degli intervistati ha invece riportato un incremento del voto dato circa la percezione termica da (-1) a (0).

Con riferimento infine alla temperatura di colore di 1,772 K, il modesto incremento di temperatura consentito è imputabile principalmente al fatto che il 38.5% dei partecipanti non ha mutato la propria percezione, mantenendo una condizione pressochè di neutralità termica.

Interessanti considerazioni circa l'influenza della temperatura di colore della luce sulla percezione termica possono poi essere fatte mettendo in relazione i voti dati dagli intervistati dopo la prova con quelli predetti adoperando il modello del Predicted Mean Vote (PMV) (Fig. 4.6). Esso è infatti l'indice maggiormente adoperato per studiare le condizioni termoigrometriche in ambiente interno.

Figura 4.6. Confronto tra i valori calcolati per il Predicted Mean Vote (PMV) ed i voti dati dai partecipanti con riferimento alle condizioni ambientali dopo le prove con luce fredda (A), luce neutrale (B) e luce calda (C).



In particolare, è possibile notare come con luce fredda la corrispondenza tra i valori predetti dal Predicted Mean Vote (PMV) ed i voti dati dagli intervistati risulti limitata. Nel 96% dei casi le variabili ambientali ed operative hanno condotto ad un valore del PMV pari a (0). Va però detto che, anche se nel 40% dei casi vi è corrisposto un uguale valore del voto, il 52% degli individui ha espresso un voto pari a (-1), confermando quindi l'importanza della tipologia di luce e della sua temperatura di colore nella predizione della percezione termica.

Capacità predittive migliori da parte del PMV sono state rilevate per una luce con temperatura di colore neutrale. Nel 56% dei casi è stato infatti rilevato un valore pari a (0) sia per il valore del suddetto indice termofisiologico che per il voto dato dai partecipanti.

La situazione risulta invece differire in presenza di una luce calda. La Fig. 4.6(C) mostra come vi sia un picco pari al 38% in corrispondenza della condizione di neutralità termica ma anche come vi sia una maggior varietà circa i thermal perception votes. A fronte di un PMV pari a (0), è stato rilevato un voto di (-2) e di (2) nel 12% e nel 4% dei casi rispettivamente.

5. CONCLUSIONI

Nell'ambito della presente tesi sono stati valutati aspetti legati al comfort termico in ambiente esterno ed interno. Con riferimento all'ambiente outdoor, si è proceduto allo sviluppo di modelli predittivi della percezione termoigrometrica, alla valutazione dell'influenza sul microclima di materiali innovativi e varie strategie di mitigazione ed alla mappatura della percezione termica sul territorio italiano e globale al variare delle stagioni. Per gli ambienti confinati, è stata invece valutata la relazione intercorrente tra sensazione termica e temperatura di colore della luce con l'obiettivo di ridurre i consumi energetici.

Per quanto concerne la creazione di nuovi indici, sono state preliminarmente analizzate la percezione e la preferenza termica della popolazione mediterranea attraverso un caso studio a Roma. Nel periodo compreso tra febbraio 2014 e gennaio 2015 ha avuto luogo una field survey trasversale: durante il suo svolgimento sono stati compilati 941 questionari da persone scelte casualmente nelle aree esterne del campus dell'Università degli Studi di Roma "Sapienza" e della sede distaccata della Facoltà di Ingegneria. Tale questionario è diviso in due parti: la prima investiga le caratteristiche personali degli intervistati (età, genere, vestiario, attività, tempo di esposizione, etc...), mentre nella seconda essi individuano la loro percezione termica attraverso l'ASHRAE 7-point scale (cold (-3), cool (-2), slightly cool (-1), neutral (0), slightly warm (+1), warm (+2) e hot (+3)) e la loro preferenza termica attraverso la McIntyre scale (cooler (-1), no change (0) e warmer (+1)). Contemporaneamente alla compilazione di ogni questionario, in prossimità dell'intervistato sono state misurate cinque variabili microclimatiche: temperatura dell'aria, temperatura media radiante, velocità del vento, umidità relativa ed irradiazione globale. Ciò ha permesso di associare ad ogni intervista un valore della Physiological Equivalent Temperature (PET).

Successivamente, dai dati così raccolti, è stato determinato (in corrispondenza di PET bins con ampiezza pari ad 1 °C) il Mean Thermal Sensation Vote (MTSV) e sono state determinate le linee di regressione tra MTSV e PET nella stagione calda e fredda. Tali relazioni hanno permesso di individuare (imponendo MTSV=0) i valori delle PET neutrali: 26.9 e 24.9 °C per la stagione calda e fredda rispettivamente.

Il medesimo approccio è stato seguito per la temperatura dell'aria: in questo caso il valore neutrale per la stagione calda è 27.2 °C mentre quello per la stagione fredda è 22.1 °C.

Anche le risposte fornite dagli intervistati circa la preferenza termica sono state valutate in corrispondenza di PET bins con una larghezza di 1°C; tuttavia, sono state correlate alla PET usando un logistic curve model con la funzione probit. Questo ha portato all'individuazione di una PET preferita di 24.8 °C per la stagione calda e di 22.5 °C per la stagione fredda. Ciò conferma, per la città di Roma, la presenza di una sorta di adattamento termico attraverso le differenti stagioni.

E' stato poi definito un "optimal comfort range": la valutazione dei MTSV in corrispondenza di PET bins con ampiezza di 1 °C è stata in questo caso estesa all'intero anno. E' stata quindi ricavata una sola linea di regressione e da questa, assumendo che l'intervallo di comfort dovrebbe corrispondere al range $-0.5 \div 0.5$ dell'ASHRAE 7-point scale, è stato definito il PET comfort range $21.1 \div 29.2$ °C.

Questa ricerca ha portato inoltre alla determinazione di un indice empirico per la valutazione dell'outdoor thermal comfort in area mediterranea. Tale indice, denominato MOCI (Mediterranean

Outdoor Comfort Index), predice il voto medio (con riferimento all'ASHRAE 7-point scale) tra quelli che un largo gruppo di persone fornirebbe nel giudicare il comfort termico di un ambiente outdoor. Le variabili indipendenti presenti nella relazione del MOCI sono temperatura media radiante, temperatura dell'aria, velocità del vento, umidità relativa ed isolamento termico del vestiario. Esse sono state ottenute attraverso una valutazione preliminare del VIF (Variance Inflationary Factor) ed una successiva Best Subsets Analysis, che ha permesso di individuare il modello migliore tra quelli possibili.

Il MOCI tuttavia predice un voto medio e pertanto può essere utile conoscere anche il numero di persone che avvertono discomfort a fronte di una data sollecitazione termica. Per questa ragione è stata adattata alla popolazione mediterranea la relazione della Predicted Percentage of Dissatisfied (PPD) proposta nell'ISO 7730.

Dal punto di vista dell'applicabilità pratica, i risultati di questo studio possono aiutare architetti, ingegneri, designers and urban planners nella valutazione predittiva del comportamento termico di uno spazio outdoor e del suo grado di abitabilità nell'area mediterranea. I risultati ottenuti possono essere utili nella scelta dei materiali costituenti il tessuto urbano (sia nelle fasi progettuali di nuovi spazi pubblici che nella riqualificazione urbana di siti esistenti). In altre parole, le relazioni proposte forniscono la possibilità di valutare numericamente le conseguenze di scelte progettuali sull'outdoor thermal comfort di una popolazione adattata alle condizioni climatiche mediterranee. Per esempio, tramite l'utilizzo di un software (i. e., ENVI-met) in grado di simulare il microclima di una data area, ipotizzando differenti scenari progettuali (ossia le caratteristiche geometriche del tessuto urbano e/o materiali di finitura delle superfici esterne), potrebbero essere ottenuti i valori delle variabili microclimatiche. Questi, utilizzati come input nella relazione del MOCI, permetterebbero per ogni configurazione simulata di ottenere indicazioni sul benessere. La relazione del MOCI e quella della PPD riadattata, con un tale utilizzo, avrebbero quindi carattere predittivo. I valori delle variabili microclimatiche potrebbero essere infine usati anche per calcolare la PET; il confronto con i corrispondenti valori della PET neutrale, della PET preferita e dell'"optimal comfort range", servirebbe quindi come ulteriore strumento di verifica.

Le prestazioni del MOCI sono state poi comparate a quelle di altri quattro indici biometeorologici: l'Actual Sensation Vote Europe (ASV_{EUROPE}), l'Effective Temperature (ET), la Physiological Equivalent Temperature (PET) ed il Predicted Mean Vote (PMV). Per effettuare tale studio è stata necessaria una field survey preliminare: essa ha avuto luogo da giugno 2015 a novembre 2015, coprendo quindi la stagione estiva (che alle latitudini mediterranee comporta le maggiori sollecitazioni termiche) e la stagione di transizione dell'autunno. Anche tale studio, che ha avuto le stesse modalità di quello precedente, è stato di tipo trasversale e sono stati compilati 592 questionari strutturati. Per effettuare il confronto, il voto dato dagli intervistati è stato quindi messo in relazione ai corrispondenti valori degli indici di comfort termico che sono stati calcolati, in funzione dei differenti modelli, sfruttando i dati personali ottenuti dai questionari ed i valori misurati delle variabili micrometeorologiche.

Il confronto è stato effettuato sulla base di tre criteri di tipo statistico ed uno di tipo qualitativo: Spearman's rho measure of correlation, symmetrical measure of association Gamma, la percentuale totale di predizioni corrette e, attraverso una cross-tabulation analysis, la distribuzione di predizio-

ni corrette per ogni classe di percezione termica. I valori assunti dai vari indici con riferimento a ciascuno dei primi tre criteri sono poi stati normalizzati rispetto al valore più alto riscontrato per quel dato criterio.

Ciò che emerge dallo studio è una buona sensibilità di PMV e MOCI, come testimoniato dai coefficienti di correlazione. Questi indici confermano poi le loro prestazioni in termini di percentuale totale di predizioni corrette: il MOCI fa registrare infatti un valore di 35.5% mentre il PMV di 32.3%.

Valori inferiori sono stati invece rilevati per i restanti tre indici. E' stato in particolare ipotizzato che ciò possa essere una conseguenza di aspetti legati a quei processi di adattamento che gli individui mettono in atto. Nei modelli alla base di MOCI e PMV interviene infatti anche la variabile operativa dell'isolamento termico del vestiario, cosa che non avviene negli altri casi. In particolare ET ed ASV_{EUROPE} possono essere determinati a partire dai soli valori delle variabili micrometeorologiche e sembrano pagare questa apparente semplicità costitutiva in termini di abilità predittiva, sia in relazione al suo valore totale che a quello determinato mediante cross-tabulation analysis per le varie loro classi.

La somma dei valori normalizzati porta quindi il MOCI ad un totale di 2.98, seguito da indici termo-fisiologici quali PMV e PET con rispettivamente 2.89 e 2.70.

Le differenze, in termini di valori predetti, tra MOCI e PMV sono state inoltre confermate dalle mappe effettuate per il territorio italiano e globale al variare delle stagioni. Il PMV infatti, essendo stato originariamente sviluppato per ambienti interni, tende a sovrastimare la sollecitazione termica.

E' stata infine discussa la relazione che intercorre tra i voti dati dagli intervistati ed i valori assunti dai vari indici, valutando l'influenza della stagione e della temperatura dell'aria. Quest'ultima risulta influenzare maggiormente PET ed ET e, ad eccezione del PMV (caratterizzato da una bassa stabilità predittiva), è stata individuata una certa tendenza da parte dei valori stimati per i vari indici a shiftare verso sensazioni termiche neutrali. Anche in questo caso la causa può essere trovata nei fenomeni di adattamento ed acclimatamento.

Sempre con riferimento agli indici empirici, si è poi cercato di ottemperare a quella necessità di standardizzazione più volta sottolineata nel settore. Nell'ambito della presente tesi è stato quindi proposto un indice empirico di validità globale, il Global Outdoor Comfort Index (GOCI).

Per tale ragione è stata preliminarmente effettuata una ricerca bibliografica volta ad individuare tutte le relazioni empiriche ottenute mediante field surveys in ambiente esterno. Queste differiscono per le variabili micrometeorologiche inserite nei vari modelli, per le scale adoperate e, chiaramente, per le località in cui gli studi sono stati di volta in volta effettuati. È stato quindi necessario ricondurre tutte le relazioni all'ASHRAE 7-point scale e, al tempo stesso, esplicitarle in funzione dello stesso tipo di variabili. Da quest'ultimo punto di vista, le variabili scelte sono la temperatura media radiante, la temperatura dell'aria, l'umidità relativa e la velocità del vento. A fronte delle medesime forzanti microclimatiche (i dati sono stati ottenuti da quelli campionati durante differenti field surveys), sono stati poi ottenuti i voti rappresentativi della percezione termica delle varie popolazioni investigate. Essi sono stati quindi settati come variabile dipendente mentre temperatura dell'aria, temperatura media radiante, umidità relativa, velocità del vento e, con riferimento alla località, latitudine, temperatura media annuale, temperatura media del mese più caldo, temperatura

media del mese più freddo ed altitudine come variabili indipendenti. È stata poi effettuata una valutazione della multicollinearità che ha portato ad escludere l'altitudine, non in grado di apportare miglioramenti rilevanti al modello. A questo punto le rimanenti variabili sono state combinate e tutti i derivanti possibili modelli sono stati valutati attraverso una Best Subsets Analysis per individuare il più performante ed arrivare alla creazione del Global Outdoor Comfort Index (GOCI). Esso, con un valore del coefficiente di Pearson di 0.616 e della statistica C_p di 8, è risultato essere quello che vede come variabili esplicative temperatura dell'aria, temperatura media radiante, umidità relativa, velocità del vento, latitudine, temperatura media annuale, temperatura media del mese più caldo e temperatura media del mese più freddo. È stato inoltre rilevato come la temperatura dell'aria sia la variabile in grado di influenzare maggiormente la percezione termica, seguita da temperatura media radiante e velocità del vento.

Attraverso gli stessi criteri usati per valutare l'abilità predittiva del MOCI, le prestazioni del GOCI sono state confrontate con quelle di altri indici (MOCI, PET e PMV). Ciò che emerge dallo studio è che l'indice più performante è il MOCI, seguito dal GOCI e dai due indici termofisiologici analizzati (PMV e PET). Nell'analisi dei risultati occorre però ricordare le peculiarità, in termini di acclimatamento, adattamento ed aspettativa termica, legate alle singole popolazioni. La field survey per valutare le prestazioni degli indici è stata infatti effettuata a Roma (Italia) e non è un caso che l'indice empirico ottenuto per studiare appositamente la percezione termica di tali individui sia quello più performante. Il GOCI è stato invece creato computando modelli basati sulla percezione termica anche di altre popolazioni e non potrà mai eguagliare le prestazioni di un indice empirico nella città o nella zona in cui esso è stato determinato. Potrà però avvicinarle cercando di implementare nel suo modello relazioni caratterizzate da uniformità di scala sensoriale, variabili indipendenti e metodologia adottata. Quest'ultima riguarda in particolare la strumentazione impiegata e le sue proprietà metrologiche, il metodo adottato per determinare la temperatura media radiante e la velocità del vento, il numero di soggetti intervistati, la tipologia di informazioni demografiche e personali raccolte. Va comunque sottolineato che il GOCI è stato ricavato combinando relazioni tarate sull'ambiente esterno e riesce a far registrare prestazioni migliori di indici creati per gli ambienti confinati (PMV) o basati su assunzioni ad essi legate (PET). Costituisce quindi un valido strumento per l'analisi dell'outdoor thermal comfort e della percezione termica in tutte quelle zone in cui non sono stati sviluppati indici empirici. Permette inoltre di soddisfare, computando nel suo modello variabili legate alla specifica località geografica, la necessità di standardizzazione manifestata nell'area degli outdoor thermal comfort indexes.

Per cercare di fornire ulteriori strumenti utili alla progettazione di spazi esterni termicamente confortevoli, è stato poi proposto un nuovo approccio simulativo per il software ENVI-met (uno dei più completi per lo studio di tali aspetti). In particolare sono stati individuati una serie di input parameters differenti rispetto a quelli comunemente adoperati ed il software è stato "forzato" inserendo una serie di dati forniti da radiosondaggi. I risultati ottenuti sono stati confrontati con valori sperimentalmente misurati sulla base del coefficiente di determinazione R^2 , del Root Mean Square Error (RMSE) e del Willmott's index of agreement (d). Sono stati ottenuti rispettivamente i valori di 0.88, 1.89 K e 0.91 per la temperatura dell'aria e di 0.96, 2.79 K e 0.87 per la temperatura media radiante. Queste due variabili sono quelle che influenzano maggiormente la percezione termica alle

latitudini mediterranee ma risultati soddisfacenti sono stati perseguiti anche per umidità relativa ed irradiazione globale. In ogni caso è stato registrato un miglioramento rispetto a quanto ottenuto in studi precedenti.

Il nuovo iter simulativo introdotto, unitamente al MOCI, è stato adoperato per confrontare tra loro differenti strategie di mitigazione del microclima urbano (cool roofs, cool pavement, aumento della vegetazione urbana ed una combinazione delle tre) con riferimento al campus dell'Università degli Studi Sapienza di Roma. Esse sono state anche comparate con la configurazione corrente del sito e con una configurazione estrema che vede l'utilizzo di solo asfalto per la ground surface e l'assenza di verde.

La soluzione più vantaggiosa è risultata essere quella che vede l'implementazione congiunta di cool roofs, cool pavement ed un aumento della vegetazione urbana. In questo caso è stato infatti rilevato un decremento del MOCI rispetto all'attuale configurazione del sito che in alcune aree è di -3.37 unità ed una diminuzione media della temperatura dell'aria di -1.49 °C. Ciò che influenza maggiormente questo risultato è l'azione schermante ed evapotraspirativa delle piante unitamente, in assenza di radiazione solare diretta, al più alto albedo della ground surface. Un contributo limitato è invece dato dai cool roofs: se adoperati come unica strategia di mitigazione, essi sono in grado di condurre ad un decremento del MOCI medio di appena -0.01 unità. Da questo punto di vista occorre però tenere in considerazione l'altezza degli edifici presenti nel sito, che allontana la quota dei roofs da quella a cui di solito le persone interagiscono.

Significativo è poi il peggioramento delle condizioni che occorrerebbe qualora venisse usato solo asfalto ed il sito venisse privato di specie vegetali. In questo caso infatti è stato riscontrato un aumento medio e massimo del MOCI rispettivamente di 0.19 e 3.05 unità. Molto rilevante sul bilancio termico dei pedoni è anche il conseguente aumento di temperatura media radiante, prossimo in alcuni punti ai 40 °C.

Presa inoltre visione del fatto che spesso i tassi di mortalità sono relazionati durante ondate di calore all'Apparent Temperature, è stato interessante stimare l'influenza delle varie configurazioni su tale indice. Per questa ragione i valori assunti dall'Apparent Temperature nella configurazione corrente del sito sono stati confrontati a quelli caratterizzanti i restanti casi e ne è stata valutata la differenza.

È emerso anche in questa analisi il minor contributo che i cool roofs sono in grado di apportare a livello dei pedoni. Ancor più interessante è il fatto che la configurazione con il cool pavement in concrete sembra assicurare maggiori vantaggi rispetto a quella che vede un solo incremento della vegetazione. Tale risultato, in contrasto con quanto indicato dal MOCI, è però una conseguenza delle relazioni alla base dei due indici: in quella dell'Apparent Temperature, a differenza di quanto accade per il MOCI, non compare infatti la temperatura media radiante e ciò non permette di apprezzare il deterioramento delle condizioni termoisometriche laddove, con radiazione solare, l'aumento di albedo porta a valori più alti di tale variabile.

Vi è invece accordo tra i due indici circa la configurazione più vantaggiosa: essa è anche in questo caso quella che vede una combinazione delle strategie di mitigazione proposte. Essa può infatti dare un decremento medio e massimo dell'Apparent Temperature di circa 2 e 3 °C, limitando in ma-

niera importante l'aumento dello stress termico in estate, la stagione in cui nell'area mediterranea è maggiore.

Con riferimento invece al caso del chiostro di San Pietro in Vincoli, è emerso come l'uso contemporaneo di materiali ad elevato albedo sui limiti verticali ed orizzontali di siti come quello studiato comporta un peggioramento del comfort termico. Il PMV in questo caso può subire incrementi che possono raggiungere in estate valori di 2.3. In particolare, è stato riscontrato un peggioramento dell'outdoor thermal comfort al diminuire dello sky view factor delle superfici con elevato coefficiente di albedo.

Va però detto che l'uso di materiali ad elevato albedo comporta generalmente un miglioramento del microclima in inverno. In climi quali quello considerato, tale miglioramento non è però della stessa entità del peggioramento che l'uso di questi materiali provoca in estate. Il miglioramento può essere quantificato, in termini di PMV, al massimo in una differenza di 1.3. Inoltre, nel clima mediterraneo, le sollecitazioni termiche di solito in inverno non sono molto intense e le persone possono limitarle adoperando vestiti con un isolamento termico maggiore.

Anche in questo caso sono state poi rilevate le buone prestazioni, in termini di mitigazione del microclima urbano, dello urban greening. In particolare i fenomeni di evapotraspirazione e la capacità delle piante di limitare la radiazione solare diretta e riflessa conducono a decrementi fino a 1.5 unità del PMV durante le ore centrali di una calda giornata estiva.

L'influenza dello sky view factor delle superfici su cui i materiali ad elevato albedo sono applicati è poi confermata dallo studio effettuato prendendo in esame il sito di via delle Carrozze. Esso è un canyon urbano rappresentativo di quelli caratterizzanti le città mediterranee e l'uso dei suddetti materiali sulla ground surface, caratterizzata da uno sky view factor di circa 0.45, conduce a decrementi del MOCI fino a 0.40 unità rispetto alla configurazione corrente. Significativo inoltre come, se i materiali ad elevato albedo sono applicati sull'involucro degli edifici, il MOCI riporti aumenti fino a 0.60 unità circa.

Passando invece alla ricerca svolta in ambiente interno, è stata valutata l'influenza della tipologia di luce e della sua temperatura di colore sulla percezione termica degli individui. Si è quindi cercato di dare un contributo relativamente alla tematica della "hue-heat hypothesis". Essa afferma che una luce caratterizzata da elevate lunghezze d'onda può condurre a percepire l'ambiente termico come più caldo e viceversa in presenza di una luce con basse lunghezze d'onda.

Ciò può chiaramente avere interessanti ripercussioni di tipo energetico. Durante la stagione calda, l'installazione di una luce fredda potrebbe ad esempio portare ad una sensazione di benessere anche a fronte di temperature dell'aria leggermente più alte, con un conseguente decremento della potenza termica scambiata con l'ambiente esterno.

Per valutare tali aspetti, è stata quindi allestita una test room caratterizzata da 3 differenti ambienti separati. In ognuno di questi ultimi, è stata poi collocata una data tipologia di lampada con l'obiettivo di esaminare l'influenza di luce fredda, neutrale e calda (le temperature di colore sono 11,530 K, 4,024 K e 1,772 K rispettivamente). Il campione è costituito da 42 individui ed ognuno di essi è stato esposto ad ogni luce per circa 30 minuti. Ogni prova è stata inoltre preceduta da un periodo atto a neutralizzare l'influenza della luce adoperata nella prova precedente sull'intervistato. Gli intervistati hanno poi indossato un vestiario quanto più possibile standardizzato ed hanno com-

pilato un questionario strutturato in accordo con l'ISO 10551. In esso si chiedeva di fornire informazioni concernenti fattori personali ed al tempo stesso di giudicare la propria percezione e preferenza termica, la tolleranza e l'accettabilità personale e la confortevolezza nello svolgere un dato compito. Durante la compilazione di ciascun questionario sono state di volta in volta misurate le variabili ambientali, permettendo di associare ad ogni intervistato determinati valori di temperatura e velocità dell'aria, temperatura media radiante ed umidità relativa.

Andando ad esaminare i risultati, è stata riscontrata una certa influenza della luce e della sua temperatura di colore sulla percezione termica. Da questo punto di vista è significativa la differenza di 0.51 unità rilevata tra i valori medi dei voti dati dai partecipanti dopo l'esposizione a luce calda e fredda.

Tali scostamenti sono stati poi confermati in termini di Friedman test mentre il Wilcoxon Signed-Rank test ha permesso di collocare le suddette differenze prevalentemente tra i voti dati dopo l'esposizione a luce calda e neutrale.

Una definizione quantitativa relativamente all'influenza della temperatura di colore della luce è stata poi effettuata in termini di test F parziale. I valori rilevati per ciascuna variabile sono stati normalizzati prendendo come riferimento il valore più alto rilevato. Significativo che la tipologia di luce abbia riportato il valore di 0.90, secondo solo a quello relativo al genere (1.00). Tali risultati sono stati confermati attraverso la statistica t. Il genere e la tipologia di luce hanno infatti riportato i valori di (-2.34) e (2.10) rispettivamente.

Con la finalità di ottenere dei risparmi energetici, è stata poi determinata la variazione di temperatura dell'aria che è possibile perseguire a seguito della differente percezione termica degli individui con le varie tipologie di luce. Nel presente studio, ogni temperatura di colore ha condotto ad un decremento del voto medio tra quelli dati dagli intervistati. Rielaborando quindi la relazione del Predicted Mean Vote (PMV) in termini di derivate parziali, sono stati quindi ottenuti possibili incrementi di temperatura dell'aria di 1.25 °C, 0.46 °C e 0.23 °C con luce fredda, neutrale e calda rispettivamente. Con riferimento alla stagione estiva, ciò significa che può essere aumentata di più di un grado la temperatura di un dato ambiente interno con luce caratterizzata da elevata temperatura di colore senza variare la percezione termica dei presenti.

L'importanza della tipologia di luce sull'indoor thermal comfort è infine testimoniata dal confronto tra i valori predetti mediante il PMV e quelli derivanti dai voti dati dagli intervistati dopo le varie prove. Il suddetto indice di comfort termico fu infatti ottenuto mediante una survey in ambienti caratterizzati da una luce neutrale. Ciò porta quindi ad avere un buon accordo con i risultati della prova svolta con una temperatura di colore di 4,024 K, ma al tempo stesso a scostamenti con quelli derivanti dall'esposizione a luce calda e fredda. Con quest'ultima è significativo come in più della metà dei casi ad un PMV pari a zero corrisponda un voto dell'intervistato di -1.

RINGRAZIAMENTI

A seguito del conseguimento di questo importante traguardo ci tenevo a ringraziare i miei genitori, che mi hanno sostenuto in ogni momento di questo percorso con aiuto costante ed infinita disponibilità.

Desidero ringraziare inoltre la mia famiglia ed i miei amici per essermi sempre stati vicini e per l'incoraggiamento.

Ringrazio poi il Prof. Andrea de Lieto Vollaro, per aver capito quelle che erano le mie inclinazioni, per avermi messo nelle migliori condizioni possibili di esprimerle e per la fiducia da subito dimostratami. Non potevo desiderare una guida migliore per un percorso di questo tipo.

Ringrazio sentitamente l'Ing. Ferdinando Salata, per avermi supportato e coadiuvato nella risoluzione di tutti i problemi che si sono presentati nelle varie fasi del lavoro, per avermi accompagnato in questo percorso di crescita tecnica, scientifica ed umana e per il rapporto di amicizia e stima reciproca che si è instaurato.

Ringrazio infine il Prof. Antonio Pena Garcia della Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos de la Universidad de Granada per aver contribuito a rendere il mio periodo di studio e ricerca a Granada indimenticabile.

PUBBLICAZIONI EFFETTUATE DAL CANDIDATO

1. Rosso, F., **GOLASI I.**, Castaldo, V. L., Piselli, C., Pisello, A. L., Salata, F., Ferrero, M., Cotana, F., de Lieto Vollaro, A. On the impact of innovative materials on outdoor thermal comfort of pedestrians in historical urban canyons, *Renewable Energy*, <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.11.074>.
2. **GOLASI, I.**, Salata, F., de Lieto Vollaro, E., Coppi M. The degradation of ammonia in absorption thermal machines, *Energy Procedia* 126 (2017) 321-328.
3. Salata, F., **GOLASI, I.**, Proietti, R., de Lieto Vollaro, A. Implications of climate and outdoor thermal comfort on tourism. The case of Italy (2017), *International Journal of Biometeorology*, pp. 1-16.
4. Nastasi, B., Lo Basso, G., Salata, F., **GOLASI, I.** Energy retrofitting of residential buildings - how to couple CHP and HP for thermal management and off-design operation (2017), *Energy and Buildings*, 151, pp. 293-305.
5. Castaldo, V. L., Rosso, F., **GOLASI I.**, Piselli, C., Salata, F., Pisello, A. L., Ferrero, M., Cotana, F., de Lieto Vollaro, A. Thermal comfort in the historical urban canyon: the effect of innovative materials, *Energy Procedia* 134 (2017) 151-160.
6. **GOLASI, I.**, Salata, F., de Lieto Vollaro, E., Coppi M. Soluzioni ammoniac-acqua nelle pompe di calore ad assorbimento - Analisi della dissociazione chimica dell' NH_3 e della sua velocità di decomposizione, *La Termotecnica* (11-2017) 60-64.
7. Salata, F., **GOLASI, I.**, Domestico, U., Banditelli, M., Lo Basso, G., Nastasi, B., de Lieto Vollaro, A. Heading towards the nZEB through CHP+HP systems. A comparison between retrofit solutions able to increase the energy performance for the heating and domestic hot water production in residential buildings (2017) *Energy Conversion and Management*, 138, pp. 61-76.
8. Salata, F., **GOLASI, I.**, Petitti, D., de Lieto Vollaro, E., Coppi, M., de Lieto Vollaro, A. Relating microclimate, human thermal comfort and health during heat waves: an analysis of heat island mitigation strategies through a case study in an urban outdoor environment (2017) *Sustainable Cities and Society*, 30, pp. 79-96.
9. Salata, F., **GOLASI, I.**, de Lieto Vollaro, R., de Lieto Vollaro, A. Urban microclimate and outdoor thermal comfort. A proper procedure to fit ENVI-met simulation outputs to experimental data (2016) *Sustainable Cities and Society*, 26, pp. 318-343.
10. **GOLASI, I.**, Salata, F., de Lieto Vollaro, E., Coppi, M. Parameters Affecting the Efficiency of a Heat Transformer with a Particular Focus on the Heat Solution (2016) *Energy Procedia*, 101, pp. 1183-1190.
11. Salata, F., Tarsitano, A., **GOLASI, I.**, de Lieto Vollaro, E., Coppi, M., de Lieto Vollaro, A. Application of Absorption Systems Powered by Solar Ponds in Warm Climates for the Air Conditioning in Residential Buildings (2016) *Energies*, 9(10), 821.
12. Salata, F., **GOLASI, I.**, Poliziani, A., Futia, A., de Lieto Vollaro, E., Coppi, M., de Lieto Vollaro, A. Management Optimization of the Luminous Flux Regulation of a Lighting System in Road Tunnels. A First Approach to the Exertion of Predictive Control Systems (2016) *Sustainability*, 8(11), 1092.
13. **GOLASI, I.**, Salata, F., de Lieto Vollaro, E., Coppi, M., de Lieto Vollaro, A. Thermal perception in the Mediterranean area: Comparing the Mediterranean Outdoor Comfort Index (MOCI) to other outdoor thermal comfort indices (2016) *Energies*, 9 (7), pp. 1-16.
14. Salata, F., **GOLASI, I.**, di Salvatore, M., de Lieto Vollaro, A. Energy and reliability optimization of a system that combines daylighting and artificial sources. A case study carried out in academic buildings (2016) *Applied Energy*, 169, pp. 250-266.
15. Salata, F., **GOLASI, I.**, de Lieto Vollaro, R., de Lieto Vollaro, A. Outdoor thermal comfort in the Mediterranean area. A transversal study in Rome, Italy (2016) *Building and Environment*, 96, pp. 46-61.
16. Salata, F., **GOLASI, I.**, de Lieto Vollaro, A., de Lieto Vollaro, R. How high albedo and traditional buildings' materials and vegetation affect the quality of urban microclimate. A case study (2015) *Energy and Buildings*, 99, pp. 32-49.

17. **GOLASI, I.**, Salata, F., Coppi, M., de Lieto Vollaro, E., de Lieto Vollaro, A. Experimental analysis of thermal fields surrounding horizontal cylindrical geothermal exchangers (2015) *Energy Procedia*, 82, pp. 294-300.
18. Salata, F., Alippi, C., Tarsitano, A., **GOLASI, I.**, Coppi, M. A first approach to natural thermoventilation of residential buildings through ventilation chimneys supplied by solar ponds (2015) *Sustainability (Switzerland)*, 7 (7), pp. 9649-9663.
19. Vallati, A., de Lieto Vollaro, A., **GOLASI, I.**, Barchiesi, E., Caranese, C. On the impact of urban micro climate on the energy consumption of buildings (2015) *Energy Procedia*, 82, pp. 506-511.
20. Nardecchia, F., Barbalace, M., Bisegna, F., Burattini, C., Gugliermetti, F., de Lieto Vollaro, A., Salata, F., **GOLASI, I.** A method to evaluate the stimulation of a real world field of view by means of a spectroradiometric analysis (2015) *Sustainability (Switzerland)*, 7 (11), pp. 14964-14981.
21. Pagliaro, F., Cellucci, L., Burattini, C., Bisegna, F., Gugliermetti, F., de Lieto Vollaro, A., Salata, F., **GOLASI, I.** A methodological comparison between energy and environmental performance evaluation (2015) *Sustainability (Switzerland)*, 7 (8), pp. 10324-10342.
22. Burattini, C., Nardecchia, F., Bisegna, F., Cellucci, L., Gugliermetti, F., de Lieto Vollaro, A., Salata, F., **GOLASI, I.** Methodological approach to the energy analysis of unconstrained historical buildings (2015) *Sustainability (Switzerland)*, 7 (8), pp. 10428-10444.
23. Salata, F., **GOLASI, I.**, Bovenzi, S., de Lieto Vollaro, E., Pagliaro, F., Cellucci, L., Coppi, M., Gugliermetti, F., de Lieto Vollaro, A. Energy optimization of road tunnel lighting systems (2015) *Sustainability (Switzerland)*, 7 (7), pp. 9664-9680.
24. Salata, F., **GOLASI, I.**, Bombelli, E., de Lieto Vollaro, E., Nardecchia, F., Pagliaro, F., Gugliermetti, F., de Lieto Vollaro, A. Case study on economic return on investments for safety and emergency lighting in road tunnels (2015) *Sustainability (Switzerland)*, 7 (8), pp. 9809-9822.
25. Salata, F., **GOLASI, I.**, de Lieto Vollaro, E., Bisegna, F., Nardecchia, F., Coppi, M., Gugliermetti, F., de Lieto Vollaro, A. Evaluation of different urban microclimate mitigation strategies through a PMV analysis (2015) *Sustainability (Switzerland)*, 7 (7), pp. 9012-9030.
26. Cellucci, L., Burattini, C., Drakou, D., Gugliermetti, F., Bisegna, F., de Lieto Vollaro, A., Salata, F., **GOLASI, I.** Urban lighting project for a small town: Comparing citizens and authority benefits (2015) *Sustainability (Switzerland)*, 7 (10), pp. 14230-14244.
27. Salata, F., **GOLASI, I.**, Falanga, G., Allegri, M., de Lieto Vollaro, E., Nardecchia, F., Pagliaro, F., Gugliermetti, F., de Lieto Vollaro, A. Maintenance and energy optimization of lighting systems for the improvement of historic buildings: A case study (2015) *Sustainability (Switzerland)*, 7 (8), pp. 10770-10788.

REFERENCES

- [1] J.K. Vanos, J.S. Warland, T.J. Gillespie, N.A. Kenny, Review of the physiology of human thermal comfort while exercising in urban landscapes and implications for bioclimatic design, *Int. J. Biometeorol.* 54 (2010) 319–334. doi:10.1007/s00484-010-0301-9.
- [2] R.S. Kovats, S. Hajat, Heat Stress and Public Health : A Critical Review, *Annu. Rev. Public Heal.* 29 (2008) 41–55. doi:10.1146/annurev.publhealth.29.020907.090843.
- [3] F. Salata, I. Golasi, D. Petitti, E. de Lieto Vollaro, M. Coppi, A. de Lieto Vollaro, Relating microclimate, human thermal comfort and health during heat waves: An analysis of heat island mitigation strategies through a case study in an urban outdoor environment, *Sustain. Cities Soc.* 30 (2017). doi:10.1016/j.scs.2017.01.006.
- [4] S. Hajat, T. Kosatky, Heat-related mortality: a review and exploration of heterogeneity., *J. Epidemiol. Community Health.* 64 (2010) 753–760. doi:10.1136/jech.2009.087999.
- [5] J.-M. Robine, S.L.K. Cheung, S. Le Roy, H. Van Oyen, C. Griffiths, J.-P. Michel, F.R. Herrmann, Death toll exceeded 70,000 in Europe during the summer of 2003, *C. R. Biol.* 331 (2008) 171–178. doi:10.1016/j.crv.2007.12.001.
- [6] A. Mavrogianni, M. Davies, M. Batty, S.E. Belcher, S.I. Bohnenstengel, D. Carruthers, Z. Chalabi, B. Croxford, C. Demanuele, S. Evans, R. Giridharan, J.N. Hacker, I. Hamilton, C. Hogg, J. Hunt, M. Kolokotroni, C. Martin, J. Milner, I. Rajapaksha, I. Ridley, J.P. Steadman, J. Stocker, P. Wilkinson, Z. Ye, The comfort, energy and health implications of London’s urban heat island, *32* (2011) 35–52. doi:10.1177/0143624410394530.
- [7] F. Salata, I. Golasi, A.D.L. Vollaro, R.D.L. Vollaro, How high albedo and traditional buildings’ materials and vegetation affect the quality of urban microclimate. A case study, *Energy Build.* 99 (2015). doi:10.1016/j.enbuild.2015.04.010.
- [8] F. Salata, I. Golasi, R. de Lieto Vollaro, A. de Lieto Vollaro, Urban microclimate and outdoor thermal comfort. A proper procedure to fit ENVI-met simulation outputs to experimental data, *Sustain. Cities Soc.* 26 (2016). doi:10.1016/j.scs.2016.07.005.
- [9] F. Salata, I. Golasi, E.L. Vollaro, F. Bisegna, F. Nardecchia, M. Coppi, F. Gugliermetti, A.L. Vollaro, Evaluation of different urban microclimate mitigation strategies through a PMV analysis, *Sustain.* 7 (2015). doi:10.3390/su7079012.
- [10] A. Oertel, R. Emmanuel, P. Drach, Assessment of predicted versus measured thermal comfort and optimal comfort ranges in the outdoor environment in the temperate climate of Glasgow, UK, *Build. Serv. Eng. Res. Technol.* 36 (2015) 482–499. doi:10.1177/0143624414564444.
- [11] K. Blazejczyk, Y. Epstein, G. Jendritzky, H. Staiger, B. Tinz, Comparison of UTCI to selected thermal indices, *Int. J. Biometeorol.* 56 (2012) 515–535. doi:10.1007/s00484-011-0453-2.
- [12] Y. Epstein, D.S. Moran, Thermal comfort and the heat stress indices, *44* (2006) 388–398. doi:10.2486/indhealth.44.388.
- [13] E. Johansson, S. Thorsson, R. Emmanuel, E. Krüger, Instruments and methods in outdoor thermal comfort studies - The need for standardization, *Urban Clim.* 10 (2014) 346–366. doi:10.1016/j.uclim.2013.12.002.
- [14] P.O. Fanger, Thermal comfort. Analysis and applications in environmental engineering., *Therm. Comf. Anal. Appl. Environ. Eng.* (1970).
- [15] ISO 7730 International Standard, Moderate thermal environments - Determination of the PMV and PPD indices and specification of the conditions for thermal comfort, (1994) 32. doi:10.1017/CBO9781107415324.004.
- [16] Ansi/Ashrae, ANSI/ASHRAE 55:2004 Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy, Ashrae. 2004 (2004) 30. doi:10.1007/s11926-011-0203-9.
- [17] G. Jendritzky, W. Nübler, A model analysing the urban thermal environment in physiologically significant terms, *Arch. Meteorol. Geophys. Bioclimatol. Ser. B.* 29 (1981) 313–326. doi:10.1007/BF02263308.
- [18] A.P. Gagge, A.P. Fobelets, L.G. Berglund, A standard predictive index of human response to the

- thermal environment, *ASHRAE Trans.* 92(2B) (1986) 709–731.
- [19] A.A. R. de Dear, J. Kalma, T. Oke, An outdoor thermal comfort index (OUT_SET*) - part I - the model and its assumptions, in: 8-12 November 1999. Conference ICB-ICUC'99, Sydney (Ed.), *Biometeorol. Urban Climatol. Turn Millenium*, Geneva, 2000: pp. 279–283.
 - [20] M.E. Fountain, C. Huizenga, A Thermal Sensation Model For Use By The Engineering Profession, *Indoor Environ. Qual. ASHRAE* (1995) 1–39.
 - [21] P. Höppe, The physiological equivalent temperature - A universal index for the biometeorological assessment of the thermal environment, *Int. J. Biometeorol.* 43 (1999) 71–75.
 - [22] P. Bröde, D. Fiala, K. Blazejczyk, I. Holmér, G. Jendritzky, B. Kampmann, B. Tinz, G. Havenith, Deriving the operational procedure for the Universal Thermal Climate Index (UTCI), *Int. J. Biometeorol.* 56 (2012) 481–494. doi:10.1007/s00484-011-0454-1.
 - [23] I. Knez, S. Thorsson, Thermal, emotional and perceptual evaluations of a park: Cross-cultural and environmental attitude comparisons, *Build. Environ.* 43 (2008) 1483–1490. doi:10.1016/j.buildenv.2007.08.002.
 - [24] W. Köppen, E. Volken, S. Brönnimann, The thermal zones of the Earth according to the duration of hot, moderate and cold periods and to the impact of heat on the organic world, *Meteorol. Zeitschrift.* 20 (2011) 351–360. doi:10.1127/0941-2948/2011/105.
 - [25] M. Nikolopoulou, S. Lykoudis, Thermal comfort in outdoor urban spaces: Analysis across different European countries, *Build. Environ.* 41 (2006) 1455–1470. doi:10.1016/j.buildenv.2005.05.031.
 - [26] F. Salata, I. Golasi, R. de Lieto Vollaro, A. de Lieto Vollaro, Outdoor thermal comfort in the Mediterranean area. A transversal study in Rome, Italy, *Build. Environ.* 96 (2016) 46–61. doi:10.1016/j.buildenv.2015.11.023.
 - [27] T.P. Lin, Thermal perception, adaptation and attendance in a public square in hot and humid regions, *Build. Environ.* 44 (2009) 2017–2026. doi:10.1016/j.buildenv.2009.02.004.
 - [28] A.H.A. Mahmoud, Analysis of the microclimatic and human comfort conditions in an urban park in hot and arid regions, *Build. Environ.* 46 (2011) 2641–2656. doi:10.1016/j.buildenv.2011.06.025.
 - [29] V. Cheng, E. Ng, C. Chan, B. Givoni, Outdoor thermal comfort study in a sub-tropical climate: A longitudinal study based in Hong Kong, *Int. J. Biometeorol.* 56 (2012) 43–56. doi:10.1007/s00484-010-0396-z.
 - [30] J. Spagnolo, R. de Dear, A field study of thermal comfort in outdoor and semi-outdoor environments in subtropical Sydney Australia, *Build. Environ.* 38 (2003) 721–738. doi:10.1016/S0360-1323(02)00209-3.
 - [31] M.W. Yahia, E. Johansson, Evaluating the behaviour of different thermal indices by investigating various outdoor urban environments in the hot dry city of Damascus, Syria, *Int. J. Biometeorol.* 57 (2013) 615–630. doi:10.1007/s00484-012-0589-8.
 - [32] M.F. Md Din, Y.Y. Lee, M. Ponraj, D.R. Ossen, K. Iwao, S. Chelliapan, Thermal comfort of various building layouts with a proposed discomfort index range for tropical climate, *J. Therm. Biol.* 41 (2014) 6–15. doi:10.1016/j.jtherbio.2014.01.004.
 - [33] K. Pantavou, M. Santamouris, D. Asimakopoulos, G. Theoharatos, Empirical calibration of thermal indices in an urban outdoor Mediterranean environment, *Build. Environ.* 80 (2014) 283–292. doi:10.1016/j.buildenv.2014.06.001.
 - [34] N. Kántor, J. Unger, Á. Gulyás, Subjective estimations of thermal environment in recreational urban spaces-Part 2: International comparison, *Int. J. Biometeorol.* 56 (2012) 1089–1101. doi:10.1007/s00484-012-0564-4.
 - [35] T.P. Lin, A. Matzarakis, Tourism climate and thermal comfort in Sun Moon Lake, Taiwan, *Int. J. Biometeorol.* 52 (2008) 281–290. doi:10.1007/s00484-007-0122-7.
 - [36] E. Krüger, F. Rossi, P. Drach, Calibration of the physiological equivalent temperature index for three different climatic regions, *Int. J. Biometeorol.* (2017) 1–14. doi:10.1007/s00484-017-

- 1310-8.
- [37] S.Q. da S. Hirashima, E.S. de Assis, M. Nikolopoulou, Daytime thermal comfort in urban spaces: A field study in Brazil, *Build. Environ.* 107 (2016) 245–253. doi:10.1016/j.buildenv.2016.08.006.
 - [38] E.C. Thom, The Discomfort Index, *Weatherwise.* 12 (1959) 57–61. doi:10.1080/00431672.1959.9926960.
 - [39] K. Pantavou, M. Santamouris, D. Asimakopoulos, G. Theoharatos, Evaluating the performance of bioclimatic indices on quantifying thermal sensation for pedestrians, *Adv. Build. Energy Res.* 7 (2013) 170–185. doi:10.1080/17512549.2013.865557.
 - [40] M.A. Ruiz, E.N. Correa, Suitability of different comfort indices for the prediction of thermal conditions in tree-covered outdoor spaces in arid cities, *Theor. Appl. Climatol.* 122 (2014) 69–83. doi:10.1007/s00704-014-1279-8.
 - [41] A. Tseliou, I.X. Tsiros, S. Lykoudis, M. Nikolopoulou, An evaluation of three biometeorological indices for human thermal comfort in urban outdoor areas under real climatic conditions, *Build. Environ.* 45 (2010) 1346–1352. doi:10.1016/j.buildenv.2009.11.009.
 - [42] P.A. Siple, C.F. Passel, Measurements of Dry Atmospheric Cooling in Subfreezing Temperatures, *Proc. Am. Philos. Soc.* 89 (1945) 177–199. https://www.jstor.org/stable/985324?seq=1#page_scan_tab_contents (accessed March 3, 2017).
 - [43] C. Koppe, G. Jendritzky, Inclusion of short-term adaptation to thermal stresses in a heat load warning procedure, *Meteorol. Zeitschrift.* 14 (2005) 271–278. doi:10.1127/0941-2948/2005/0030.
 - [44] I. Knez, S. Thorsson, Thermal, emotional and perceptual evaluations of a park: Cross-cultural and environmental attitude comparisons, *Build. Environ.* 43 (2008). doi:10.1016/j.buildenv.2007.08.002.
 - [45] International Organization for Standardization, ISO 7730:2005 - Ergonomics of the Thermal Environment – Analytical Determination and Interpretation of Thermal Comfort using Calculation of the PMV and PPD Indices and Local Thermal Comfort Criteria, (2005).
 - [46] Missenard: Etude physiologique et technique de la... - Google Scholar, (n.d.). [https://scholar.google.com/scholar_lookup?title=Etude physiologique et technique de la ventilation&author=A.. Missenard&publication_year=1933](https://scholar.google.com/scholar_lookup?title=Etude+physiologique+et+technique+de+la+ventilation&author=A.+Missenard&publication_year=1933) (accessed November 17, 2017).
 - [47] P.O. Fanger, *Thermal Comfort: Analysis and Applications in Environmental Engineering*, McGraw-Hill Inc, New York, 1970.
 - [48] ISO 10551:1995 - Ergonomics of the thermal environment -- Assessment of the influence of the thermal environment using subjective judgement scales, (n.d.). <https://www.iso.org/standard/18636.html> (accessed March 8, 2017).
 - [49] L. Zhao, X. Zhou, L. Li, S. He, R. Chen, Study on outdoor thermal comfort on a campus in a subtropical urban area in summer, *Sustain. Cities Soc.* 22 (2016) 164–170. doi:10.1016/j.scs.2016.02.009.
 - [50] M.A. Ruiz, E.N. Correa, Adaptive model for outdoor thermal comfort assessment in an Oasis city of arid climate, *Build. Environ.* 85 (2015) 40–51. doi:10.1016/j.buildenv.2014.11.018.
 - [51] B. Givoni, M. Noguchi, H. Saaroni, O. Pochter, Y. Yaakov, N. Feller, S. Becker, Outdoor comfort research issues, *Energy Build.* 35 (2003) 77–86. doi:10.1016/S0378-7788(02)00082-8.
 - [52] N. Metje, M. Sterling, C.J. Baker, Pedestrian comfort using clothing values and body temperatures, *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.* 96 (2008) 412–435. doi:10.1016/j.jweia.2008.01.003.
 - [53] D. Lai, C. Zhou, J. Huang, Y. Jiang, Z. Long, Q. Chen, Outdoor space quality: A field study in an urban residential community in central China, *Energy Build.* 68 (2014) 713–720. doi:10.1016/j.enbuild.2013.02.051.
 - [54] L.M. Monteiro, M.P. Alucci, An outdoor thermal comfort index for the subtropics, in: 26th Conf. Passiv. Low Energy Archit., Quebec City, Canada, n.d.

- [55] N. Kántor, L. Égerházi, J. Unger, Subjective estimation of thermal environment in recreational urban spaces-Part 1: Investigations in Szeged, Hungary, *Int. J. Biometeorol.* 56 (2012) 1075–1088. doi:10.1007/s00484-012-0523-0.
- [56] A. Middel, N. Selover, B. Hagen, N. Chhetri, Impact of shade on outdoor thermal comfort - a seasonal field study in Tempe, Arizona, *Int. J. Biometeorol.* 60 (2016) 1849–1861. doi:10.1007/s00484-016-1172-5.
- [57] S. Shooshtarian, I. Ridley, The effect of individual and social environments on the users thermal perceptions of educational urban precincts, *Sustain. Cities Soc.* 26 (2016) 119–133. doi:10.1016/j.scs.2016.06.005.
- [58] M.H. Elnabawi, N. Hamza, S. Dudek, Thermal perception of outdoor urban spaces in the hot arid region of Cairo, Egypt, *Sustain. Cities Soc.* 22 (2016) 136–145. doi:10.1016/j.scs.2016.02.005.
- [59] E. Krüger, P. Drach, R. Emmanuel, O. Corbella, Urban heat island and differences in outdoor comfort levels in Glasgow, UK, *Theor. Appl. Climatol.* 112 (2013) 127–141. doi:10.1007/s00704-012-0724-9.
- [60] S.Q. da S. Hirashima, E.S. de Assis, M. Nikolopoulou, Daytime thermal comfort in urban spaces: A field study in Brazil, *Build. Environ.* 107 (2016) 245–253. doi:10.1016/j.buildenv.2016.08.006.
- [61] K. Li, Y. Zhang, L. Zhao, Outdoor thermal comfort and activities in the urban residential community in a humid subtropical area of China, *Energy Build.* 133 (2016) 498–511. doi:10.1016/j.enbuild.2016.10.013.
- [62] B. Yang, T. Olofsson, G. Nair, A. Kabanshi, Outdoor thermal comfort under subarctic climate of north Sweden - A pilot study in Umea, *Sustain. Cities Soc.* 28 (2017) 387–397. doi:10.1016/j.scs.2016.10.011.
- [63] T.P. Lin, R. De Dear, R.L. Hwang, Effect of thermal adaptation on seasonal outdoor thermal comfort, *Int. J. Climatol.* 31 (2011) 302–312. doi:10.1002/joc.2120.
- [64] M. Tsitoura, T. Tsoutsos, T. Daras, Evaluation of comfort conditions in urban open spaces. Application in the island of Crete, *Energy Convers. Manag.* 86 (2014) 250–258. doi:10.1016/j.enconman.2014.04.059.
- [65] T. Stathopoulos, H. Wu, J. Zacharias, Outdoor human comfort in an urban climate, *Build. Environ.* 39 (2004) 297–305. doi:10.1016/j.buildenv.2003.09.001.
- [66] T. Xi, Q. Li, A. Mochida, Q. Meng, Study on the outdoor thermal environment and thermal comfort around campus clusters in subtropical urban areas, *Build. Environ.* 52 (2012) 162–170. doi:10.1016/j.buildenv.2011.11.006.
- [67] Sangkertadi, A field study of outdoor thermal comfort in the warm-humid environment, *Int. Conf. ;Conveesh 2nd Senvar 13th; Yogyakarta.* (2012).
- [68] Indoor climate / by D.A. McIntyre. - Version details - Trove, (n.d.). <http://trove.nla.gov.au/work/9963023?selectedversion=NBD1781312> (accessed November 17, 2017).
- [69] M. Nikolopoulou, N. Baker, K. Steemers, Thermal comfort in outdoor urban spaces: Understanding the Human parameter, *Sol. Energy.* 70 (2001). doi:10.1016/S0038-092X(00)00093-1.
- [70] P. Höppe, Different aspects of assessing indoor and outdoor thermal comfort, *Energy Build.* 34 (2002) 661–665. doi:10.1016/S0378-7788(02)00017-8.
- [71] S. Thorsson, M. Lindqvist, S. Lindqvist, Thermal bioclimatic conditions and patterns of behaviour in an urban park in Göteborg, Sweden, *Int. J. Biometeorol.* 48 (2004). doi:10.1007/s00484-003-0189-8.
- [72] P. Bröde, E.L. Krüger, F.A. Rossi, D. Fiala, Predicting urban outdoor thermal comfort by the Universal Thermal Climate Index UTCI-a case study in Southern Brazil, *Int. J. Biometeorol.* 56 (2012). doi:10.1007/s00484-011-0452-3.
- [73] D. Lai, D. Guo, Y. Hou, C. Lin, Q. Chen, Studies of outdoor thermal comfort in northern China,

- Build. Environ. 77 (2014) 110–118. doi:10.1016/j.buildenv.2014.03.026.
- [74] B. Givoni, M. Noguchi, H. Saaroni, O. Pochter, Y. Yaakov, N. Feller, S. Becker, Outdoor comfort research issues, *Energy Build.* 35 (2003). doi:10.1016/S0378-7788(02)00082-8.
 - [75] E.L. Krüger, F.A. Rossi, Effect of personal and microclimatic variables on observed thermal sensation from a field study in southern Brazil, *Build. Environ.* 46 (2011). doi:10.1016/j.buildenv.2010.09.013.
 - [76] D. Lai, C. Zhou, J. Huang, Y. Jiang, Z. Long, Q. Chen, Outdoor space quality: A field study in an urban residential community in central China, *Energy Build.* 68 (2014). doi:10.1016/j.enbuild.2013.02.051.
 - [77] J.F. Yin, Y.F. Zheng, R.J. Wu, J.G. Tan, D.X. Ye, W. Wang, An analysis of influential factors on outdoor thermal comfort in summer, *Int. J. Biometeorol.* 56 (2012) 941–948. doi:10.1007/s00484-011-0503-9.
 - [78] W. Yang, N.H. Wong, S.K. Jusuf, Thermal comfort in outdoor urban spaces in Singapore, *Build. Environ.* 59 (2013) 426–435. doi:10.1016/j.buildenv.2012.09.008.
 - [79] ISO 7726:1998 - Ergonomics of the thermal environment -- Instruments for measuring physical quantities, (n.d.). <https://www.iso.org/standard/14562.html> (accessed March 9, 2017).
 - [80] S. Oliveira, H. Andrade, An initial assessment of the bioclimatic comfort in an outdoor public space in Lisbon, *Int. J. Biometeorol.* 52 (2007) 69–84. doi:10.1007/s00484-007-0100-0.
 - [81] H. Andrade, M.J. Alcoforado, S. Oliveira, Perception of temperature and wind by users of public outdoor spaces: Relationships with weather parameters and personal characteristics, *Int. J. Biometeorol.* 55 (2011) 665–680. doi:10.1007/s00484-010-0379-0.
 - [82] C. Bouden, N. Ghrab, An adaptive thermal comfort model for the Tunisian context: A field study results, *Energy Build.* 37 (2005) 952–963. doi:10.1016/j.enbuild.2004.12.003.
 - [83] M.D. Mifflin, S.T. St Jeor, L.A. Hill, B.J. Scott, S.A. Daugherty, Y.O. Koh, A new predictive equation for resting energy expenditure in healthy individuals., *Am. J. Clin. Nutr.* 51 (1990) 241–7. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/2305711> (accessed March 9, 2017).
 - [84] T.H. ALLEN, M.T. PENG, K.P. CHEN, T.F. HUANG, C. CHANG, H.S. FANG, Prediction of blood volume and adiposity in man from body weight and cube of height., *Metabolism.* 5 (1956) 328–45. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/13321516> (accessed March 9, 2017).
 - [85] A. Matzarakis, F. Rutz, H. Mayer, Modelling radiation fluxes in simple and complex environments—application of the RayMan model, *Int. J. Biometeorol.* 51 (2007) 323–334. doi:10.1007/s00484-006-0061-8.
 - [86] S. Petrarca, F. Spinelli, E. Coglianini, M. Mancini, No Title, *Clim. Profile Italy* (in Ital. 5 (1999).
 - [87] I.D. Stewart, T.R. Oke, Local climate zones for urban temperature studies, *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 93 (2012) 1879–1900. doi:10.1175/BAMS-D-11-00019.1.
 - [88] P. Hoppe, Heat balance modelling, *Experientia.* 49 (1993) 741–746.
 - [89] F.C. Houghten, C.P. Yaglou, Determining lines of equal comfort, *ASHVE Trans.* 29 (1923) 163–176.
 - [90] E. Ng, V. Cheng, Urban human thermal comfort in hot and humid Hong Kong, *Energy Build.* 55 (2012) 51–65. doi:10.1016/j.enbuild.2011.09.025.
 - [91] D.W. Marquardt, “You Should Standardize the Predictor Variables in Your Regression Models,” discussion of “A Critique of Some Ridge Regression Methods,” by G. Smith and F. Campbell, *J. Am. Stat. Assoc.* 75 (1980) 87–91.
 - [92] I. Eliasson, I. Knez, U. Westerberg, S. Thorsson, F. Lindberg, Climate and behaviour in a Nordic city, *Landsc. Urban Plan.* 82 (2007). doi:10.1016/j.landurbplan.2007.01.020.
 - [93] F. Lindberg, B. Holmer, S. Thorsson, SOLWEIG 1.0 - Modelling spatial variations of 3D radiant fluxes and mean radiant temperature in complex urban settings, *Int. J. Biometeorol.* 52 (2008). doi:10.1007/s00484-008-0162-7.
 - [94] H. Mayer, J. Holst, P. Dostal, F. Imbery, D. Schindler, Human thermal comfort in summer within an urban street canyon in Central Europe, *Meteorol. Zeitschrift.* 17 (2008).

- doi:10.1127/0941-2948/2008/0285.
- [95] J.F. Nicol, M.A. Humphreys, Thermal comfort as part of a self-regulating system, *Build. Res. Pract.* 1 (1973) 174–179. doi:10.1080/09613217308550237.
 - [96] R.J. Kuczmarski, C.L. Ogden, S.S. Guo, L.M. Grummer-Strawn, K.M. Flegal, Z. Mei, R. Wei, L.R. Curtin, A.F. Roche, C.L. Johnson, 2000 CDC Growth Charts for the United States: methods and development., *Vital Health Stat.* 11. (2002) 1–190. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/12043359> (accessed November 19, 2017).
 - [97] Dati climatici sulle città del mondo - Climate-Data.org, (n.d.). <https://it.climate-data.org/> (accessed March 10, 2017).
 - [98] F. Lindberg, B. Holmer, S. Thorsson, SOLWEIG 1.0 – Modelling spatial variations of 3D radiant fluxes and mean radiant temperature in complex urban settings, *Int. J. Biometeorol.* 52 (2008) 697–713. doi:10.1007/s00484-008-0162-7.
 - [99] I. Golasi, F. Salata, E. de Lieto Vollaro, M. Coppi, A. de Lieto Vollaro, Thermal perception in the mediterranean area: Comparing the mediterranean outdoor comfort index (moci) to other outdoor thermal comfort indices, *Energies.* 9 (2016). doi:10.3390/en9070550.
 - [100] 2017 World Population Data Sheet, (n.d.). <http://www.prb.org/Publications/Datasheets/2017/2017-world-population-data-sheet.aspx> (accessed November 6, 2017).
 - [101] 中华人民共和国国家统计局&中国统计年鉴, (n.d.). <http://www.stats.gov.cn/tjsj/ndsj/> (accessed November 21, 2017).
 - [102] N. Mazhar, R.D. Brown, N. Kenny, S. Lenzholzer, Thermal comfort of outdoor spaces in Lahore Pakistan: Lessons for bioclimatic urban design in the context of global climate change, *Landsc. Urban Plan.* (2016).
 - [103] S. Hajat, R.S. Kovats, K. Lachowycz, Heat-related and cold-related deaths in England and Wales: Who is at risk?, *Occup. Environ. Med.* 64 (2007) 93–100. doi:10.1136/oem.2006.029017.
 - [104] Z. Tan, K.K.-L. Lau, E. Ng, Urban tree design approaches for mitigating daytime urban heat island effects in a high-density urban environment, *Energy Build.* 114 (2016). doi:10.1016/j.enbuild.2015.06.031.
 - [105] H. Akbari, M. Pomerantz, H. Taha, Cool surfaces and shade trees to reduce energy use and improve air quality in urban areas, *Sol. Energy.* 70 (2001) 295–310. doi:10.1016/S0038-092X(00)00089-X.
 - [106] T. Asaeda, V.T. Ca, A. Wake, Heat storage of pavement and its effect on the lower atmosphere, *Atmos. Environ.* 30 (1996) 413–427. doi:10.1016/1352-2310(94)00140-5.
 - [107] F. Salata, I. Golasi, A.D.L. Vollaro, R.D.L. Vollaro, How high albedo and traditional buildings' materials and vegetation affect the quality of urban microclimate. A case study, *Energy Build.* 99 (2015). doi:10.1016/j.enbuild.2015.04.010.
 - [108] E. Alexandri, P. Jones, Temperature decreases in an urban canyon due to green walls and green roofs in diverse climates, *Build. Environ.* 43 (2008) 480–493. doi:10.1016/j.buildenv.2006.10.055.
 - [109] W. Klemm, B.G. Heusinkveld, S. Lenzholzer, M.H. Jacobs, B. Van Hove, Psychological and physical impact of urban green spaces on outdoor thermal comfort during summertime in The Netherlands, *Build. Environ.* 83 (2015) 120–128. doi:10.1016/j.buildenv.2014.05.013.
 - [110] A.H.A. Mahmoud, Analysis of the microclimatic and human comfort conditions in an urban park in hot and arid regions, *Build. Environ.* 46 (2011). doi:10.1016/j.buildenv.2011.06.025.
 - [111] M. Park, A. Hagishima, J. Tanimoto, K.-I. Narita, Effect of urban vegetation on outdoor thermal environment: Field measurement at a scale model site, *Build. Environ.* 56 (2012) 38–46. doi:10.1016/j.buildenv.2012.02.015.
 - [112] A.H. Rosenfeld, H. Akbari, J.J. Romm, M. Pomerantz, Cool communities: strategies for heat island mitigation and smog reduction, *Energy Build.* 28 (1998) 51–62. doi:10.1016/S0378-7788(97)00063-7.

- [113] B. Blocken, W.D. Janssen, T. van Hooff, CFD simulation for pedestrian wind comfort and wind safety in urban areas: General decision framework and case study for the Eindhoven University campus, *Environ. Model. Softw.* 30 (2012) 15–34. doi:10.1016/j.envsoft.2011.11.009.
- [114] T.R. Oke, Review of urban climatology, *Rev. Urban Climatol.* (1979).
- [115] A.J. Arnfield, Two decades of urban climate research: A review of turbulence, exchanges of energy and water, and the urban heat island, *Int. J. Climatol.* 23 (2003) 1–26. doi:10.1002/joc.859.
- [116] M. Bruse, H. Fleer, Simulating surface-plant-air interactions inside urban environments with a three dimensional numerical model, *Environ. Model. Softw.* 13 (1998). doi:10.1016/S1364-8152(98)00042-5.
- [117] F.S. De La Flor, S.A. Domínguez, Modelling microclimate in urban environments and assessing its influence on the performance of surrounding buildings, *Energy Build.* 36 (2004) 403–413. doi:10.1016/j.enbuild.2004.01.050.
- [118] T. Shen, D.H.C. Chow, J. Darkwa, Simulating the influence of microclimatic design on mitigating the Urban Heat Island effect in the Hangzhou Metropolitan Area of China, *Int. J. Low-Carbon Technol.* 11 (2013) ctt050. doi:10.1093/ijlct/ctt050.
- [119] J. Kapsomenakis, D. Kolokotsa, T. Nikolaou, M. Santamouris, S.C. Zerefos, Forty years increase of the air ambient temperature in Greece: The impact on buildings, *Energy Convers. Manag.* 74 (2013) 353–365. doi:10.1016/j.enconman.2013.05.005.
- [120] F. Salata, I. Golasi, R. de Lieto Vollaro, A. de Lieto Vollaro, Outdoor thermal comfort in the Mediterranean area. A transversal study in Rome, Italy, *Build. Environ.* 96 (2016). doi:10.1016/j.buildenv.2015.11.023.
- [121] M. Nikolopoulou, J. Kleissl, P.F. Linden, S. Lykoudis, Pedestrians' perception of environmental stimuli through field surveys: Focus on particulate pollution, *Sci. Total Environ.* 409 (2011) 2493–2502. doi:10.1016/j.scitotenv.2011.02.002.
- [122] ENVI_MET – Decoding Urban Nature, (n.d.). <http://www.envi-met.com/> (accessed November 21, 2017).
- [123] H. Lee, H. Mayer, L. Chen, Contribution of trees and grasslands to the mitigation of human heat stress in a residential district of Freiburg, Southwest Germany, *Landsc. Urban Plan.* 148 (2016). doi:10.1016/j.landurbplan.2015.12.004.
- [124] D.H.S. Duarte, P. Shinzato, C.S. Gusson, C.A. Alves, The impact of vegetation on urban microclimate to counterbalance built density in a subtropical changing climate, *Urban Clim.* 14 (2015). doi:10.1016/j.uclim.2015.09.006.
- [125] V. Tsilini, S. Papantoniou, D.-D. Kolokotsa, E.-A. Maria, Urban gardens as a solution to energy poverty and urban heat island, *Sustain. Cities Soc.* 14 (2015) 323–333. doi:10.1016/j.scs.2014.08.006.
- [126] C. Skelhorn, S. Lindley, G. Levermore, The impact of vegetation types on air and surface temperatures in a temperate city: A fine scale assessment in Manchester, UK, *Landsc. Urban Plan.* 121 (2014). doi:10.1016/j.landurbplan.2013.09.012.
- [127] N. Müller, W. Kuttler, A.-B. Barlag, Counteracting urban climate change: Adaptation measures and their effect on thermal comfort, *Theor. Appl. Climatol.* 115 (2014). doi:10.1007/s00704-013-0890-4.
- [128] T.E. Morakinyo, Y.F. Lam, Simulation study on the impact of tree-configuration, planting pattern and wind condition on street-canyon's micro-climate and thermal comfort, *Build. Environ.* 103 (2016) 262–275. doi:10.1016/j.buildenv.2016.04.025.
- [129] A. Middel, K. Häb, A.J. Brazel, C.A. Martin, S. Guhathakurta, Impact of urban form and design on mid-afternoon microclimate in Phoenix Local Climate Zones, *Landsc. Urban Plan.* 122 (2014). doi:10.1016/j.landurbplan.2013.11.004.
- [130] C. Ketterer, A. Matzarakis, Comparison of different methods for the assessment of the urban heat island in Stuttgart, Germany, *Int. J. Biometeorol.* 59 (2015). doi:10.1007/s00484-014-

0940-3.

- [131] Y. Wang, J. Zacharias, Landscape modification for ambient environmental improvement in central business districts - A case from Beijing, *Urban For. Urban Green.* 14 (2015). doi:10.1016/j.ufug.2014.11.005.
- [132] A. Ghaffarianhoseini, U. Berardi, A. Ghaffarianhoseini, Thermal performance characteristics of unshaded courtyards in hot and humid climates, *Build. Environ.* 87 (2015). doi:10.1016/j.buildenv.2015.02.001.
- [133] C. Ketterer, A. Matzarakis, Human-biometeorological assessment of heat stress reduction by replanning measures in Stuttgart, Germany, *Landsc. Urban Plan.* 122 (2014). doi:10.1016/j.landurbplan.2013.11.003.
- [134] A. Middel, N. Chhetri, R. Quay, Urban forestry and cool roofs: Assessment of heat mitigation strategies in Phoenix residential neighborhoods, *Urban For. Urban Green.* 14 (2015). doi:10.1016/j.ufug.2014.09.010.
- [135] K. Perini, A. Magliocco, Effects of vegetation, urban density, building height, and atmospheric conditions on local temperatures and thermal comfort, *Urban For. Urban Green.* 13 (2014) 495–506. doi:10.1016/j.ufug.2014.03.003.
- [136] M.W. Yahia, E. Johansson, Influence of urban planning regulations on the microclimate in a hot dry climate: The example of Damascus, Syria, *J. Hous. Built Environ.* 28 (2013). doi:10.1007/s10901-012-9280-y.
- [137] Y. Wang, U. Berardi, H. Akbari, Comparing the effects of urban heat island mitigation strategies for Toronto, Canada, *Energy Build.* 114 (2016). doi:10.1016/j.enbuild.2015.06.046.
- [138] Y. Wang, H. Akbari, Development and application of “thermal radiative power” for urban environmental evaluation, *Sustain. Cities Soc.* 14 (2015) 316–322. doi:10.1016/j.scs.2014.07.003.
- [139] D. Ambrosini, G. Galli, B. Mancini, I. Nardi, S. Sfarra, Evaluating mitigation effects of urban heat islands in a historical small center with the ENVI-Met® climate model, *Sustain.* 6 (2014). doi:10.3390/su6107013.
- [140] M. Razzaghamanesh, S. Beecham, T. Salemi, The role of green roofs in mitigating Urban Heat Island effects in the metropolitan area of Adelaide, South Australia, *Urban For. Urban Green.* 15 (2016) 89–102. doi:10.1016/j.ufug.2015.11.013.
- [141] G. Lobaccaro, J.A. Acero, Comparative analysis of green actions to improve outdoor thermal comfort inside typical urban street canyons, *Urban Clim.* 14 (2015). doi:10.1016/j.uclim.2015.10.002.
- [142] S. Sodoudi, P. Shahmohamadi, K. Vollack, U. Cubasch, A.I. Che-Ani, Mitigating the Urban Heat Island Effect in Megacity Tehran, *Adv. Meteorol.* 2014 (2014) 1–19. doi:10.1155/2014/547974.
- [143] F. Peron, M.M. De Maria, F. Spinazzè, U. Mazzali, An analysis of the urban heat island of Venice mainland, *Sustain. Cities Soc.* 19 (2015) 300–309. doi:10.1016/j.scs.2015.05.008.
- [144] B. Song, K. Park, Contribution of greening and high-albedo coatings to improvements in the thermal environment in complex urban areas, *Adv. Meteorol.* 2015 (2015). doi:10.1155/2015/792172.
- [145] C. O'Malley, P. Piroozfar, E.R.P. Farr, F. Pomponi, Urban Heat Island (UHI) mitigating strategies: A case-based comparative analysis, *Sustain. Cities Soc.* 19 (2015) 222–235. doi:10.1016/j.scs.2015.05.009.
- [146] M. Taleghani, D.J. Sailor, M. Tenpierik, A. van den Dobbelen, Thermal assessment of heat mitigation strategies: The case of Portland State University, Oregon, USA, *Build. Environ.* 73 (2014) 138–150. doi:10.1016/j.buildenv.2013.12.006.
- [147] S.-R. Yang, T.-P. Lin, An integrated outdoor spaces design procedure to relieve heat stress in hot and humid regions, *Build. Environ.* 99 (2016) 149–160. doi:10.1016/j.buildenv.2016.01.001.
- [148] J.S. Lee, J.T. Kim, M.G. Lee, Mitigation of urban heat island effect and greenroofs, *Indoor Built*

- Environ. 23 (2014). doi:10.1177/1420326X12474483.
- [149] B. Jänicke, F. Meier, M.-T. Hoelscher, D. Scherer, Evaluating the effects of façade greening on human bioclimate in a complex Urban environment, *Adv. Meteorol.* 2015 (2015). doi:10.1155/2015/747259.
 - [150] E. Johansson, J. Spangenberg, M.L. Gouvêa, E.D. Freitas, Scale-integrated atmospheric simulations to assess thermal comfort in different urban tissues in the warm humid summer of São Paulo, Brazil, *Urban Clim.* 6 (2013). doi:10.1016/j.uclim.2013.08.003.
 - [151] H. Taleb, D. Taleb, Enhancing the thermal comfort on urban level in a desert area: Case study of Dubai, United Arab Emirates, *Urban For. Urban Green.* 13 (2014) 253–260. doi:10.1016/j.ufug.2014.01.003.
 - [152] A. Qaid, D.R. Ossen, Effect of asymmetrical street aspect ratios on microclimates in hot, humid regions, *Int. J. Biometeorol.* 59 (2015). doi:10.1007/s00484-014-0878-5.
 - [153] M. Taleghani, L. Kleerekoper, M. Tenpierik, A. Van Den Dobbelsteen, Outdoor thermal comfort within five different urban forms in the Netherlands, *Build. Environ.* 83 (2015) 65–78. doi:10.1016/j.buildenv.2014.03.014.
 - [154] J.A. Acero, K. Herranz-Pascual, A comparison of thermal comfort conditions in four urban spaces by means of measurements and modelling techniques, *Build. Environ.* 93 (2015). doi:10.1016/j.buildenv.2015.06.028.
 - [155] S. Park, S.E. Tuller, Advanced view factor analysis method for radiation exchange, *Int. J. Biometeorol.* 58 (2014) 161–178. doi:10.1007/s00484-013-0657-8.
 - [156] Y.-C. Chen, T.-P. Lin, A. Matzarakis, Comparison of mean radiant temperature from field experiment and modelling: a case study in Freiburg, Germany, *Theor. Appl. Climatol.* 118 (2014). doi:10.1007/s00704-013-1081-z.
 - [157] S. Park, S.E. Tuller, M. Jo, Application of Universal Thermal Climate Index (UTCI) for microclimatic analysis in urban thermal environments, *Landsc. Urban Plan.* 125 (2014) 146–155. doi:10.1016/j.landurbplan.2014.02.014.
 - [158] S. Thorsson, M. Lindqvist, S. Lindqvist, Thermal bioclimatic conditions and patterns of behaviour in an urban park in Göteborg, Sweden, *Int. J. Biometeorol.* 48 (2004). doi:10.1007/s00484-003-0189-8.
 - [159] G. Jendritzky, W. Nübler, A model analysing the urban thermal environment in physiologically significant terms, *Arch. Meteorol. Geophys. Bioclimatol. Ser. B.* 29 (1981). doi:10.1007/BF02263308.
 - [160] T. Xi, Q. Li, A. Mochida, Q. Meng, Study on the outdoor thermal environment and thermal comfort around campus clusters in subtropical urban areas, *Build. Environ.* 52 (2012). doi:10.1016/j.buildenv.2011.11.006.
 - [161] J.A. Leech, R. Burnett, W. Nelson, S.D. Aaron, M. Raizenne, Outdoor air pollution epidemiologic studies, *Am. J. Respir. Crit. Care Med.* 161 (2000) A308.
 - [162] A. Pisello, F. Cotana, A. Nicolini, L. Brinchi, Development of Clay Tile Coatings for Steep-Sloped Cool Roofs, *Energies.* 6 (2013) 3637–3653. doi:10.3390/en6083637.
 - [163] Commissione europea: CORDIS: Progetti e risultati: Rediscovering the urban realm and open spaces (RUROS), (n.d.). http://cordis.europa.eu/project/rcn/54204_it.html (accessed November 21, 2017).
 - [164] J. Busby, M. Lewis, H. Reeves, R. Lawley, Initial geological considerations before installing ground source heat pump systems, *Q. J. Eng. Geol. Hydrogeol.* 42 (2009) 295–306. doi:10.1144/1470-9236/08-092.
 - [165] I.D. Stewart, T.R. Oke, Local climate zones for urban temperature studies, *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 93 (2012). doi:10.1175/BAMS-D-11-00019.1.
 - [166] X. Yang, L. Zhao, M. Bruse, Q. Meng, Evaluation of a microclimate model for predicting the thermal behavior of different ground surfaces, *Build. Environ.* 60 (2013). doi:10.1016/j.buildenv.2012.11.008.
 - [167] P. Conry, A. Sharma, M.J. Potosnak, L.S. Leo, E. Bensman, J.J. Hellmann, H.J.S. Fernando,

- Chicago's heat island and climate change: Bridging the scales via dynamical downscaling, *J. Appl. Meteorol. Climatol.* 54 (2015). doi:10.1175/JAMC-D-14-0241.1.
- [168] B.C. Hedquist, A.J. Brazel, Seasonal variability of temperatures and outdoor human comfort in Phoenix, Arizona, U.S.A., *Build. Environ.* 72 (2014). doi:10.1016/j.buildenv.2013.11.018.
- [169] Association of German Engineers, VDI guideline 3787 - Methods for the human-biometeorological assessment of climate and air hygiene for urban and regional planning. Part I: Climate, (1998).
- [170] R.G. Steadman, R.G. Steadman, A Universal Scale of Apparent Temperature, *J. Clim. Appl. Meteorol.* 23 (1984) 1674–1687. doi:10.1175/1520-0450(1984)023<1674:AUSOAT>2.0.CO;2.
- [171] B. Lalic, D.T. Mihailovic, An empirical relation describing leaf-area density inside the forest for environmental modeling, *J. Appl. Meteorol.* 43 (2004). doi:10.1175/1520-0450(2004)043<1641:AERDL>2.0.CO;2.
- [172] International Organization for Standardization, ISO 6946:2007 - Building components and building elements? Thermal resistance and thermal transmittance – Calculation method, (2007).
- [173] Y.-C. Chen, T.-P. Lin, A. Matzarakis, Comparison of mean radiant temperature from field experiment and modelling: a case study in Freiburg, Germany, *Theor. Appl. Climatol.* 118 (2014). doi:10.1007/s00704-013-1081-z.
- [174] A. Baklanov, J. Burzynski, A. Christen, M. Deserti, K. De Ridder, S. Emeis, The urban surface energy budget and mixing height in European cities: data, models and challenges for urban meteorology and air quality. Final Report of Working Group 2 of COST-715 Action, (2004).
- [175] G. Dubois, J.-P. Ceron, S. Gössling, C.M. Hall, Weather preferences of French tourists: lessons for climate change impact assessment, *Clim. Change.* 136 (2016) 339–351. doi:10.1007/s10584-016-1620-6.
- [176] O. Katerusha, A. Matzarakis, Thermal bioclimate and climate tourism analysis for odessa, black sea, *Geogr. Ann. Ser. A, Phys. Geogr.* 97 (2015) 671–679. doi:10.1111/geoa.12107.
- [177] A. Matzarakis, F. Rutz, H. Mayer, Modelling radiation fluxes in simple and complex environments - Application of the RayMan model, *Int. J. Biometeorol.* 51 (2007). doi:10.1007/s00484-006-0061-8.
- [178] M.B. Gómez Martín, Weather, climate and tourism: A geographical perspective, *Ann. Tour. Res.* 32 (2005) 571–591. doi:10.1016/j.annals.2004.08.004.
- [179] A. Matzarakis, Weather- and climate-related information for tourism, *Tour. Hosp. Plan. Dev.* 3 (2006) 99–115. doi:10.1080/14790530600938279.
- [180] WTO, World Trade Organization - Home page, (2014). <https://www.wto.org/> (accessed November 27, 2017).
- [181] D. Perkins, K. Debbage, Weather and Tourism: Thermal Comfort and Zoological Park Visitor Attendance, *Atmosphere (Basel)*. 7 (2016) 44. doi:10.3390/atmos7030044.
- [182] C.R. de Freitas, Tourism climatology: evaluating environmental information for decision making and business planning in the recreation and tourism sector, *Int. J. Biometeorol.* 48 (2003) 45–54. doi:10.1007/s00484-003-0177-z.
- [183] M.G. Grillakis, A.G. Koutroulis, I.K. Tsanis, The 2 °C global warming effect on summer European tourism through different indices, *Int. J. Biometeorol.* 60 (2016) 1205–1215. doi:10.1007/s00484-015-1115-6.
- [184] ISTAT - Centro Diffusione Dati, VIAGGI E VACANZE IN ITALIA E ALL'ESTERO, 2017.
- [185] K. Błazejczyk, Multiannual and seasonal weather fluctuations and tourism in Poland, in: B. Amelung, K. Błazejczyk, A. Matzarakis (Eds.), *Clim. Chang. Tour. Assess. Copying Strateg.*, Maastricht-Warsaw-Freiburg, 2007: pp. 69–90.
- [186] Q. Ge, Q. Kong, J. Xi, J. Zheng, Application of UTCI in China from tourism perspective, *Theor. Appl. Climatol.* 128 (2017) 551–561. doi:10.1007/s00704-016-1731-z.
- [187] Proceedings of the First International Workshop on Climate, Tourism and Recreation, (n.d.).

http://www.mif.uni-freiburg.de/isb/ws/papers/full_report.pdf#page=137 (accessed November 27, 2017).

- [188] T. Lin, A. Matzarakis, Tourism climate information based on human thermal perception in Taiwan and Eastern China, *Tour. Manag.* 32 (2011) 492–500. doi:10.1016/j.tourman.2010.03.017.
- [189] T.-P. Lin, A. Matzarakis, Tourism climate and thermal comfort in Sun Moon Lake, Taiwan, *Int. J. Biometeorol.* 52 (2008). doi:10.1007/s00484-007-0122-7.
- [190] M.L. Stein, *Interpolation of Spatial Data : Some Theory for Kriging*, Springer New York, 1999.
- [191] E. Becheri, I. Nuccio, Italiani in viaggio. Come cambiano le preferenze, *Mercur. S.r.l. – Tur.* (2015) 48.
- [192] W. Geerts, *Top 100 City Destinations Ranking*, London (UK), 2015.
- [193] F. Salata, I. Golasi, R. Proietti, A. de Lieto Vollaro, Implications of climate and outdoor thermal comfort on tourism: the case of Italy, *Int. J. Biometeorol.* (2017). doi:10.1007/s00484-017-1430-1.
- [194] T.-P. Lin, R. de Dear, R.-L. Hwang, Effect of thermal adaptation on seasonal outdoor thermal comfort, *Int. J. Climatol.* 31 (2011) 302–312. doi:10.1002/joc.2120.
- [195] M. Beccali, M. Cellura, M. Fontana, S. Longo, M. Mistretta, Energy retrofit of a single-family house: Life cycle net energy saving and environmental benefits, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 27 (2013) 283–293. doi:10.1016/j.rser.2013.05.040.
- [196] F.G. Montoya, A. Peña-García, A. Juaidi, F. Manzano-Agugliaro, Indoor lighting techniques: An overview of evolution and new trends for energy saving, *Energy Build.* 140 (2017) 50–60. doi:10.1016/j.enbuild.2017.01.028.
- [197] D. Carter, The measured and predicted performance of passive solar light pipe systems, *Light. Res. Technol.* 34 (2002) 39–51. doi:10.1191/1365782802li029oa.
- [198] M. Al Marwae, D.J. Carter, A field study of tubular daylight guidance installations, *Light. Res. Technol.* 38 (2006) 241–258. doi:10.1191/1365782806lrt170oa.
- [199] F. Salata, I. Golasi, M. di Salvatore, A. de Lieto Vollaro, Energy and reliability optimization of a system that combines daylighting and artificial sources. A case study carried out in academic buildings, *Appl. Energy.* 169 (2016). doi:10.1016/j.apenergy.2016.02.022.
- [200] M.M. Aman, G.B. Jasmon, H. Mokhlis, A.H.A. Bakar, Analysis of the performance of domestic lighting lamps, *Energy Policy.* 52 (2013) 482–500. doi:10.1016/j.enpol.2012.09.068.
- [201] R. Amorim, V. Molina-Moreno, A. Peña-García, Proposal for Sustainable Dynamic Lighting in Sport Facilities to Decrease Violence among Spectators, *Sustainability.* 8 (2016) 1298. doi:10.3390/su8121298.
- [202] R. Amorim, J. López, V. Molina-Moreno, A. Peña-García, Use of Natural Light vs. Cold LED Lighting in Installations for the Recovery of Victims of Gender Violence: Impact on Energy Consumption and Victims' Recovery, *Sustainability.* 9 (2017) 562. doi:10.3390/su9040562.
- [203] F.C. HOUGHTEN, H.T. OLSON, J. J. SUCIU, Sensation of Warmth as Affected by the Color of the Environment., *Illum. Eng.* 35 (1940) 908–14. <https://www.cabdirect.org/cabdirect/abstract/19412700554> (accessed November 1, 2017).
- [204] P.C. Berry, Effect of colored illumination upon perceived temperature., *J. Appl. Psychol.* 45 (1961) 248–250. doi:10.1037/h0040221.
- [205] P.O. FANGER, N.O. BREUM, E. JERKING, Can Colour and Noise Influence Man's Thermal Comfort?, *Ergonomics.* 20 (1977) 11–18. doi:10.1080/00140137708931596.
- [206] F. Albers, J. Maier, C. Marggraf-Micheel, In search of evidence for the hue-heat hypothesis in the aircraft cabin, *Light. Res. Technol.* 6 (2014) 1–12. doi:10.1177/1477153514546784.
- [207] T.C. Greene, P.A. Bell, Additional considerations concerning the effects of “warm” and “cool” wall colours on energy conservation, *Ergonomics.* 23 (1980) 949–954. doi:10.1080/00140138008924804.
- [208] C.A. Bennett, P. Rey, What's So Hot about Red?, *Hum. Factors J. Hum. Factors Ergon. Soc.* 14 (1972) 149–154. doi:10.1177/001872087201400204.

- [209] L.-C. Ou, M.R. Luo, A. Woodcock, A. Wright, A study of colour emotion and colour preference. Part I: Colour emotions for single colours, *Color Res. Appl.* 29 (2004) 232–240. doi:10.1002/col.20010.
- [210] H.-N. Ho, D. Iwai, Y. Yoshikawa, J. Watanabe, S. Nishida, Combining colour and temperature: A blue object is more likely to be judged as warm than a red object., *Sci. Rep.* 4 (2014) 5527. doi:10.1038/srep05527.
- [211] M. te Kulve, L. Schellen, L.J.M. Schlangen, W.D. van Marken Lichtenbelt, The influence of light on thermal responses, *Acta Physiol.* 216 (2016) 163–185. doi:10.1111/apha.12552.
- [212] S. Kuno, H. Ohno, N. Nakahara, Thermal sensation in transitional conditions and the hue-heat hypothesis, in: *Environ. Transition. IAPS 9th Int. Conf. Haifa, Isr.* 7–10 July 1986, 1986.
- [213] L. Clark, *The Ancient Art of Color Therapy*, (n.d.). <https://www.amazon.com/Ancient-Art-Color-Therapy/dp/0671445081> (accessed November 1, 2017).
- [214] J. Itten, *Kunst der Farbe*, (n.d.). <https://www.zvab.com/servlet/BookDetailsPL?bi=17299748057&searchurl=hl%3Don%26tn%3Dkunst%2Bder%2Bfarbe%26sortby%3D20%26an%3Ditten> (accessed November 1, 2017).
- [215] D.M. Pedersen, M. Johnson, J.H. West, Effects of Room Hue on Ratings of Self, Other, and Environment, *Percept. Mot. Skills.* 46 (1978) 403–410. doi:10.2466/pms.1978.46.2.403.
- [216] V. Candas, A. Dufour, Thermal comfort: multisensory interactions?, *J. Physiol. Anthropol. Appl. Human Sci.* 24 (2005) 33–6. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/15684540> (accessed November 1, 2017).
- [217] J. Winzen, F. Albers, C. Marggraf-Micheel, The influence of coloured light in the aircraft cabin on passenger thermal comfort, *Light. Res. Technol.* 46 (2014) 465–475. doi:10.1177/1477153513484028.
- [218] H. Nakamura, M. Oki, Influence of air temperature on preference for color temperature of general lighting in the room, *J Human-Environ Syst.* 4 (2000) 41–47.
- [219] T. Morita, H. Tokura, Effects of lights of different color temperature on the nocturnal changes in core temperature and melatonin in humans., *Appl. Human Sci.* 15 (1996) 243–246. doi:10.2114/jpa.15.243.
- [220] C. Cajochen, M. Münch, S. Kriebel, K. Kräuchi, R. Steiner, P. Oelhafen, S. Orgül, A. Wirz-Justice, High sensitivity of human melatonin, alertness, thermoregulation, and heart rate to short wavelength light, *J. Clin. Endocrinol. Metab.* 90 (2005) 1311–1316. doi:10.1210/jc.2004-0957.
- [221] a Yasukouchi, Y. Yasukouchi, K. Ishibashi, Effects of color temperature of fluorescent lamps on body temperature regulation in a moderately cold environment., *J. Physiol. Anthropol. Appl. Human Sci.* 19 (2000) 125–134. doi:10.2114/jpa.19.125.
- [222] L. Shi, Effect of illumination and color temperature of lighting on human thermoregulation, *J Shanghai Jiao Tong Univ.* 47 (2013) 1616–1620.
- [223] EN 12464-1 - European Standards, (n.d.). https://www.en-standard.eu/csn-en-12464-1-light-and-lighting-lighting-of-work-places-part-1-indoor-work-places/?gclid=EAIaIQobChMIi-rTk7zN1wIVzZ3tCh1l9AgzEAAYASAAEgKESPD_BwE (accessed November 20, 2017).
- [224] G.M. Huebner, D.T. Shipworth, S. Gauthier, C. Witzel, P. Raynham, W. Chan, Saving energy with light? Experimental studies assessing the impact of colour temperature on thermal comfort, *Energy Res. Soc. Sci.* 15 (2016) 45–57. doi:10.1016/j.erss.2016.02.008.
- [225] R.R. Baniya, E. Tetri, J. Virtanen, L. Halonen, The effect of correlated colour temperature of lighting on thermal sensation and thermal comfort in a simulated indoor workplace, *Indoor Built Environ.* 0 (2016) 1–9. doi:10.1177/1420326X16673214.