

UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE



FACOLTÀ DI INGEGNERIA

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile

VALUTAZIONE DELLE PRESTAZIONI
DI MATERIALI DA COSTRUZIONE AD ALTO ALBEDO

PERFORMANCE EVALUATION
OF HIGH-ALBEDO MATERIALS

Candidato
Michele Di Noia

Relatore
Prof. Ing. Passerini Giorgio

Correlatrice
Ing. Ferrotti Gilda

a.a 2019/2020

INDICE

INDICE DELLE FIGURE	
Sommario.....	1
Introduzione.....	2
1 L'ISOLA DI CALORE URBANA	4
1.1 Il fenomeno.....	4
1.2 Le tipologie	4
1.2.1 L'isola di calore di superficie.....	4
1.2.2 L'isola di calore atmosferica	5
1.3 Cause e fattori influenti	7
1.3.1 Le variabili controllabili	7
2 BENESSERE TERMOIGROMETRICO	15
2.1 Aspetti generali	15
2.2 Il sistema termoregolatore dell'uomo	15
2.3 Bilancio termico del corpo umano	16
2.3.1 Considerazioni introduttive	16
2.3.2 La potenza metabolica M	19
2.3.3 La potenza meccanica scambiata con l'esterno P	21
2.3.4 Il flusso termico scambiato per convezione C	21
2.3.5 Il flusso termico scambiato per irraggiamento R.....	22
2.3.6 Il flusso termico dovuto ad evaporazione E	23
2.4 Relazione di Fanger	24
2.5 Gli indici globali di benessere PMV e PPD	27
2.5.1 Calcolo del PMV	29
3 LE TECNICHE DI MITIGAZIONE	31
3.1 Tetti freddi	31
3.2 Pavimentazioni fredde	33

3.2.1	L'albedo nelle pavimentazioni	34
3.2.2	Benefici	35
3.2.3	Tipi di pavimentazioni	37
3.2.4	Slurry seal convenzionale e gommato	41
3.2.5	Verniciatura/Rivestimento superficiale colorato	41
3.3	Aree verdi e vegetazione	41
3.4	Tetti verdi.....	42
4	IL MODELLO ENVI-met.....	46
4.1	Introduzione	46
4.1.1	Input	47
	La sezione Spaces contiene i dati geometrici e qualitativi del modello simulato, come:	47
4.1.2	Interfaccia di simulazione.....	49
4.1.3	Output	50
4.1.4	Lettura degli output	53
4.2	Modelli di calcolo	55
4.2.1	Ipotesi di calcolo e condizioni iniziali	55
4.2.2	Modello del vento	56
4.2.3	Modello delle turbolenze	57
4.2.4	Modello della temperatura e dell'umidità	57
4.2.5	Modello dei flussi radiativi	58
4.2.6	Modello del suolo	58
5	LE SIMULAZIONI	60
5.1	Descrizione dei siti	60
5.2	Caratteristiche dei materiali	62
5.3	ENVIMET	63
5.3.1	Area Input Files	64

5.3.2	MODELLAZIONE DELLE AREE	66
5.3.3	ENVI-guide	72
5.3.4	ENVI-core	78
5.3.5	Biomet	80
5.3.6	Leonardo.....	87
5.4	Gli scenari di simulazione	88
6	CONCLUSIONI	121
	Bibliografia	122

INDICE DELLE FIGURE

Fig. 1 Percentuale della popolazione residente a metà dell'anno nelle aree urbane del globo (World Urbanization Prospects, The 2014 Revision)	2
Fig. 2 Temperature epidermiche diurne e notturne in aree con diverso utilizzo del suolo (Oke, 2003)	5
Fig. 3 Temperature e intensità dell'isola di calore dello strato della copertura urbana (CLUHI) in condizioni "ideali" durante il giorno e la notte (Oke, 2003)	6
Fig. 4 Tipologie di UHI in relazione ai diversi metodi di misurazione (Oke, 2003)	6
Fig. 5 L'impermeabilità delle superfici urbane determina una minore umidità disponibile per i processi di evapotraspirazione (Akbari, 2008).....	8
Fig. 6 Direzione dei flussi radiativi di giorno (a) e di notte (b) (Oke, 1997)	9
Fig. 7 Valori tipici di albedo per i più noti materiali delle aree urbane.....	10
Fig. 8 Le riflessioni e gli assorbimenti multipli in un canyon urbano incrementano l'albedo del sistema	11
Fig. 9 Rappresentazione schematica di un canyon urbano (Oke, 1997)	12
Fig. 10 Regimi fluidodinamici in ambiente urbano in funzione dei rapporti fra l'altezza H degli edifici e la distanza W rispetto alla direzione del vento (Oke, 1997)	13
Fig. 11 Bilancio energetico sistema uomo	17
Fig. 12 Scambi termici uomo- ambiente	18
Fig. 13 Valori di met per attività fisica e/o intellettuali	19
Fig. 14 Valori di met in funzione del tipo di attività desunti dalle normative tecniche UNI EN ISO 7730 2006, UNI EN ISO 9920 2009.....	20
Fig. 15 Resistenza termica per abbigliamento tipo (UNI EN ISO 7730 2006, UNI EN ISO 9920 2009).....	20
Fig. 16 Diagrammi delle linee di benessere di Fanger	26
Fig. 17 Voto medio previsto di sensazione termica del corpo (PMV) assegnato a diverse sensazioni psicofisiche.....	27
Fig. 18 Distribuzione statistica del PPD al variare del PMV (NOR)	28
Fig. 19 Valori di PMV e PPD su campione di 1300 persone votanti.....	28
Fig. 20 Calcolo del PMV tramite metodo grafico	29
Fig. 21 Valori per la determinazione del PMV in funzione della tipologia di vestiti (NOR)..	30

Fig. 22 Albedo, emissività e temperatura epidermica di equilibrio di differenti coperture urbane in una calda giornata estiva (Shen, 2008)	32
Fig. 23 Albedo tipico per calcestruzzo e conglomerato bituminoso negli anni (EPA, Ottobre 2008).....	34
Fig. 24 Immagini di 5 campioni colorati a spessore sottile e di una pavimentazione nera convenzionale nel campo del visibile a sinistra e in quello dell'infrarosso a destra. (Synnefa, 2009).....	39
Fig. 25 Aggregati di colore chiaro (Levinson, 2001)	40
Fig. 26 Elementi primari, secondari e accessori di un tetto verde secondo la norma UNI11235 del 2007.....	43
Fig. 27 Esempio di schema dei vari strati che compongono un tetto verde estensivo	44
Fig. 28 Struttura del software ENVI-met	47
Fig. 29 ENVI-met LEONARDO	54
Fig. 30 Porto di Ancona	60
Fig. 31 Aeroporto Raffaello Sanzio Falconara.....	62
Fig. 32 Sezione Spaces	64
Fig. 33 Località del modello	64
Fig. 34 Geometria del modello	65
Fig. 35 Sezione DEM adibita alla creazione delle curve di livello	66
Fig. 36 Sezione Soil and Surface	67
Fig. 37 Sezione Buildings.....	68
Fig. 38 Sezione Vegetation	69
Fig. 39 Modello 3D del Porto di Ancona.....	70
Fig. 40 Modello 3D dell'Aeroporto Raffaello Sanzio	70
Fig. 41 ENVI-guide	72
Fig. 42 Sezione ENVI-guide adibita alla creazione di una nuova simulazione	72
Fig. 43 ENVI-guide sezione General simulation settings	73
Fig. 44 ENVI-guide sezione adibita alla selezione del file area	74
Fig. 45 ENVI-guide Dati Metereologici di base	75
Fig. 46 ENVI-guide Temperatura e Umidità relativa	76
Fig. 47 ENVI-guide soil, pollutant and cloud settings.....	77
Fig. 48 ENVI-core	78
Fig. 49 ENVI-core sezione adibita al lancio della simulazione	79

Fig. 50 Biomet	80
Fig. 51 Biomet sezione adibita al calcolo degli indici di benessere termico PMV, PPD e TMR	80
Fig. 52 Andamento timico della TMR durante nelle 24 ore	83
Fig. 53 Leonardo.....	87
Fig. 54 Leonardo, aspetto all'apertura della sezione	87
Fig. 55 Porto di Ancona, stato dell'arte, ore 12, TEMPERATURA DELL'ARIA.....	89
Fig. 56 Porto di Ancona, scenario di riabilitazione, ore 12, TEMPERATURA DELL'ARIA	90
Fig. 57 Porto di Ancona, stato dell'arte, ore 18, TEMPERATURA DELL'ARIA.....	91
Fig. 58 Porto di Ancona, scenario di riabilitazione, ore 18, TEMPERATURA DELL'ARIA	92
Fig. 59 Porto di Ancona, stato dell'arte, ore 12, TEMPERATURA MEDIA RADIANTE	93
Fig. 60 Porto di Ancona, scenario di riabilitazione, ore 12, TEMPERATURA MEDIA RADIANTE	94
Fig. 61 Porto di Ancona, stato dell'arte, ore 18, TEMPERATURA MEDIA RADIANTE	95
Fig. 62 Porto di Ancona, scenario di riabilitazione, ore 18, TEMPERATURA MEDIA RADIANTE	96
Fig. 63 Porto di Ancona, stato dell'arte, ore 12, PMV.....	97
Fig. 64 Porto di Ancona, scenario di riabilitazione, ore 12, PMV	98
Fig. 65 Porto di Ancona, stato dell'arte, ore 18, PMV	99
Fig. 66 Porto di Ancona, scenario di riabilitazione, ore 18, PMV	100
Fig. 67 Porto di Ancona, stato dell'arte, ore 12, PPD.....	101
Fig. 68 Porto di Ancona, scenario di riabilitazione, ore 12, PPD.....	102
Fig. 69 Porto di Ancona, stato dell'arte, ore 18, PPD.....	103
Fig. 70 Porto di Ancona, scenario di riabilitazione, ore 18, PPD.....	104
Fig. 71 Aeroporto Raffaello Sanzio, stato dell'arte, ore 12, TEMPERATURA DELL'ARIA	105
Fig. 72 Aeroporto Raffaello Sanzio, scenario di riabilitazione, ore 12, TEMPERATURA DELL'ARIA.....	106
Fig. 73 Aeroporto Raffaello Sanzio, stato dell'arte, ore 18, TEMPERATURA DELL'ARIA	107
Fig. 74 Aeroporto Raffaello Sanzio, scenario di riabilitazione, ore 18, TEMPERATURA DELL'ARIA.....	108
Fig. 75 Aeroporto Raffaello Sanzio, stato dell'arte, ore 12, TEMPERATURA MEDIA RADIANTE	109

Fig. 76 Aeroporto Raffaello Sanzio, scenario di riabilitazione, ore 12, TEMPERATURA MEDIA RADIANTE.....	110
Fig. 77 Aeroporto Raffaello Sanzio, stato dell'arte, ore 18, TEMPERATURA MEDIA RADIANTE	111
Fig. 78 Aeroporto Raffaello Sanzio, scenario di riabilitazione, ore 18, TEMPERATURA MEDIA RADIANTE.....	112
Fig. 79 Aeroporto Raffaello Sanzio, stato dell'arte, ore 12, PMV	113
Fig. 80 Aeroporto Raffaello Sanzio, scenario di riabilitazione, ore 12, PMV	114
Fig. 81 Aeroporto Raffaello Sanzio, stato dell'arte, ore 18, PMV	115
Fig. 82 Aeroporto Raffaello Sanzio, scenario di riabilitazione, ore 18, PMV	116
Fig. 83 Aeroporto Raffaello Sanzio, stato dell'arte, ore 12, PPD	117
Fig. 84 Aeroporto Raffaello Sanzio, scenario di riabilitazione, ore 12, PPD.....	118
Fig. 85 Aeroporto Raffaello Sanzio, stato dell'arte, ore 18, PPD	119
Fig. 86 Aeroporto Raffaello Sanzio, scenario di riabilitazione, ore 18, PPD	120

Sommario

L'aumento della temperatura nelle città rispetto alle zone rurali limitrofe prende il nome di effetto isola di calore urbana e, associato al riscaldamento globale, ha un forte impatto su ambiente, energia e salute. La seguente tesi di laurea vuole illustrare le cause e le conseguenze di ciò che l'effetto isola di calore urbana determina, il suo significato ed i modelli di calcolo per mitigare l'isola di calore urbana nonché sensibilizzare l'opinione pubblica su una questione apparentemente astratta ma che tocca tutti inevitabilmente da vicino. Mi sono quindi avvalso dell'ausilio di ENVI-met, un software di calcolo di tipo S.V.A.T. (Soil, Vegetation and Atmosphere Transfer) in grado di operare su micro-scala e di simulare l'evoluzione temporale di diversi parametri termo-fluidodinamici all'interno di una griglia tridimensionale. L'analisi è stata effettuata studiando il contributo offerto da materiali ad alto albedo su due aree della città di Ancona, rispettivamente il Porto e l'Aeroporto.

Introduzione

La crescita economica e la presenza di un numero sempre maggiore di opportunità di lavoro nelle città hanno portato l'uomo con il tempo, a preferire le aree urbane rispetto alle zone rurali. Le previsioni attestano che oltre l'80% della popolazione dell'Unione europea vivrà nei centri urbani entro il 2050, risultato da esaminare con attenzione per pianificare, in maniera oculata, strategie energetiche, ambientali e di salute pubblica.

I cambiamenti climatici stanno portando a temperature ambientali sempre maggiori e ad ondate di calore più frequenti e di durata superiore. Considerando inoltre la crescita demografica a livello globale in forte aumento, si intuisce come la strada più sbagliata possa essere l'espansione urbana incontrollata.

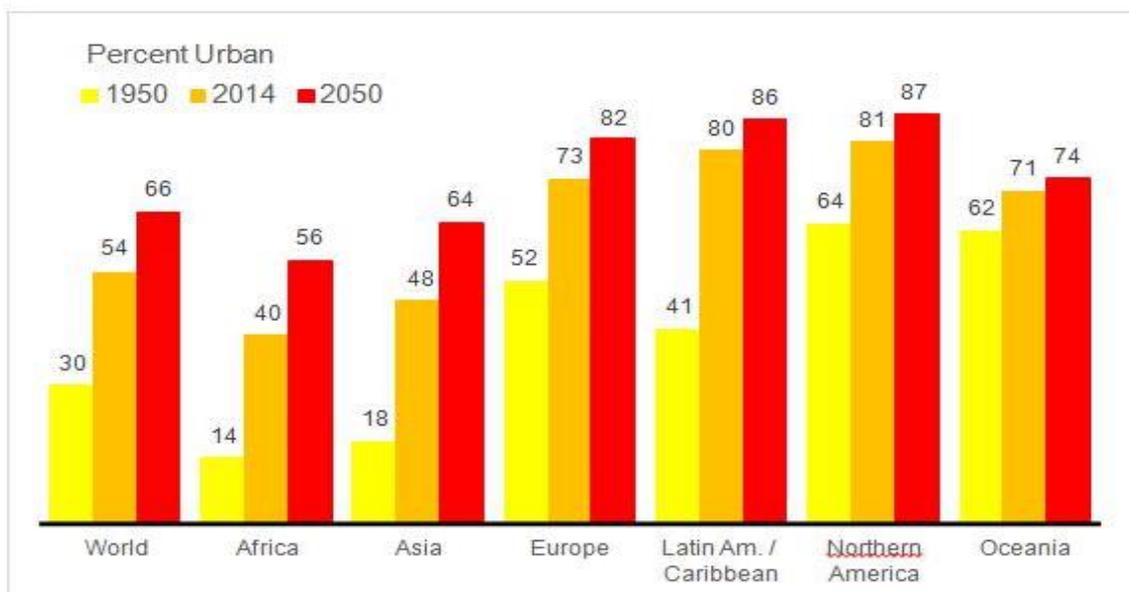


Fig. 1 Percentuale della popolazione residente a metà dell'anno nelle aree urbane del globo (World Urbanization Prospects, The 2014 Revision)

L'innalzamento della temperatura è dovuto principalmente alle modifiche della superficie terrestre: dove prima vi era una presenza ingente di suolo e vegetazione adesso troviamo strade, abitazioni e palazzi, realizzati con materiali ad elevato assorbimento solare oltre che impermeabili e aventi proprietà termiche elevate che incrementano l'accumulo di energia e il rilascio tardivo di calore.

A ciò si aggiungono anche le attività antropiche: gli scarichi dei trasporti pubblici e privati, dei sistemi di riscaldamento degli edifici e il calore dissipato dai sistemi di condizionamento d'aria. Inoltre, secondo recenti studi, per ogni grado in più di temperatura dell'aria, aumenta la domanda di energia elettrica dallo 0.45% al 4.6% andando così a generare un circolo vizioso. Quindi, per poter ottenere

dei risultati sorprendenti a livello di confort termico, occorre operare sugli elementi che compongono lo spazio urbano, essendo questi i principali responsabili del microclima locale.

1 L'ISOLA DI CALORE URBANA

1.1 Il fenomeno

Con il termine Isola di calore urbana (Urban heat island–UHI) si indica il fenomeno che ha portato ad un incremento della temperatura nelle aree urbane rispetto alle rurali. Se cambia il territorio, in particolare se si modifica quella che è la copertura superficiale terrestre, assistiamo ad un cambiamento del microclima nei luoghi che hanno subito profonde variazioni. L'UHII (Urban heat island intensity) è il parametro con cui si quantifica la differenza di temperatura tra le due aree sopraindicate. Il fenomeno presenta evidenti differenze nei mesi dell'anno, varia da area geografica, dipende fortemente dalle condizioni atmosferiche, dai giorni dell'anno, dalle ore del giorno e presenta dei picchi di temperatura nelle aree dove l'edilizia urbana è significativa.

1.2 Le tipologie

Il risultato degli studi di Oke nel 1995 portò a individuare due tipologie principali di isola di calore urbana:

- L'isola di calore di superficie (Surface UHI–SUHI);
- L'isola di calore atmosferica (Atmospheric UHI–AUHI).

Nonostante si parla dello stesso tipo di fenomeno è importante effettuare queste classificazioni perché esse differiscono per origine, evoluzione nel tempo e tecniche di misurazione.

1.2.1 L'isola di calore di superficie

Durante una giornata estiva, calda e soleggiata, il sole riscalda le superfici asciutte (tetti, strade e marciapiedi), arrivando a temperature molto più alte rispetto all'aria (da 27°C a 50°C) (Bretz, 1997), le superfici ombreggiate o umide presentano invece temperature confrontabili con quelle dell'aria. Statisticamente la differenza di temperatura superficiale diurna tra aree urbane e rurali è di 10°C-15°C, mentre quella notturna è tipicamente più piccola e va da 5°C a 10 °C (Oke, 2003). L'isola di calore di superficie è quindi molto più evidente di giorno e varia con le stagioni poiché caratterizzate da diverse radiazioni solari, coperture del terreno e condizioni meteorologiche. Il risultato di tale

variazione è che l'isola di calore di superficie è tipicamente più grande in estate. La misurazione dell'SUHI avviene tramite telerilevamento, utilizzando dei sensori in grado di interagire a distanza con le superfici di interesse e rilevarne la radiazione infrarossa emessa.

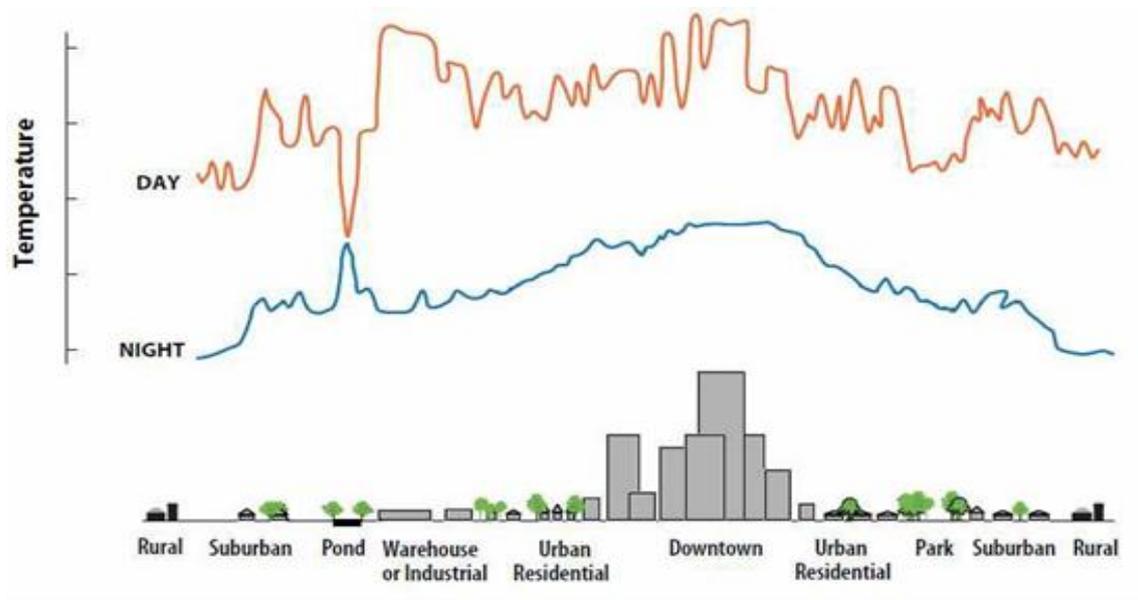


Fig. 2 Temperature epidermiche diurne e notturne in aree con diverso utilizzo del suolo (Oke, 2003)

1.2.2 L'isola di calore atmosferica

Viene ulteriormente distinta in:

- Boundary Layer Urban Heat Island (BLUHI), quando interessa lo strato limite urbano (UBL), ubicato al di sopra dell'altezza media degli edifici, è lo strato d'aria che va dalla fine di alberi e tetti alle zone dove il paesaggio urbano non influenza più l'atmosfera (si estende per 1.5 km) (Oke, 1997);
- Canopy Layer Urban Heat Island (CLUHI), se riferita allo strato della copertura urbana (UCL), situato sotto l'altezza media degli edifici, è lo strato d'aria dove le persone vivono, dal suolo fino ad arrivare all'altezza di alberi e tetti.

Quando parliamo di Isola di calore atmosferica facciamo di solito riferimento alla CLUHI poiché interessa direttamente lo strato d'aria dove l'uomo vive. Queste due tipologie sono spesso deboli durante il mattino tardi e durante il giorno, ma diventano più evidenti dopo il tramonto a causa del lento rilascio di calore da parte delle infrastrutture urbane. Rispetto alla SUHI la variazione di intensità è minore, infatti la temperatura media dell'aria nelle grandi città potrebbe essere di 1-3 °C più calda di quella delle zone rurali circostanti (Oke, 1997). La misura della

temperatura dell'aria avviene attraverso una fitta rete di punti di campionamento, da postazioni fisse o mobili (entrambi metodi di misurazione diretta).

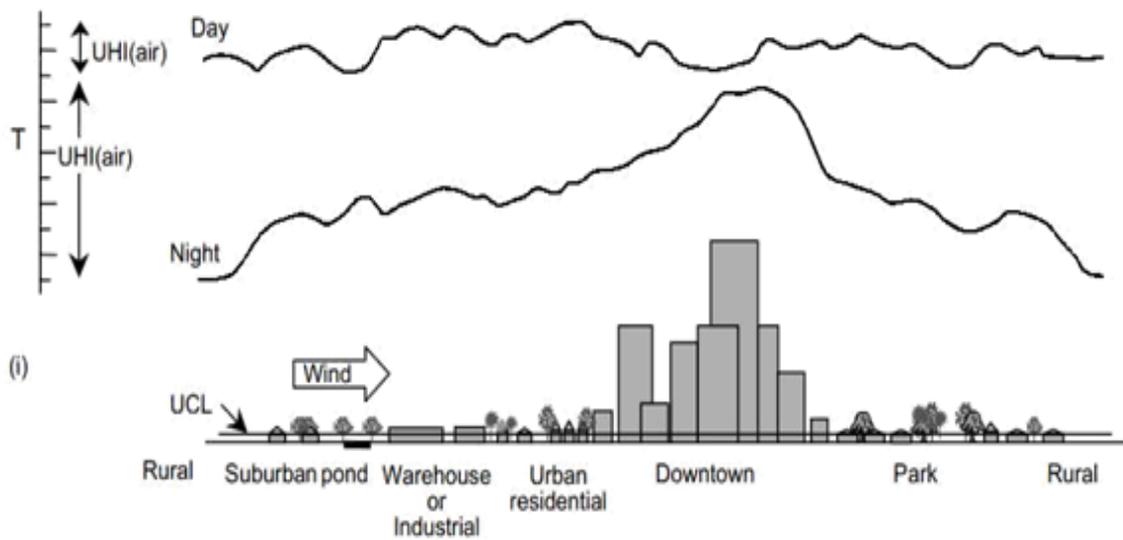


Fig. 3 Temperature e intensità dell'isola di calore dello strato della copertura urbana (CLUHI) in condizioni "ideali" durante il giorno e la notte (Oke, 2003)

In figura 4 sono presenti le diverse tipologie di UHI in relazione alle metodologie impiegate per le misurazioni.

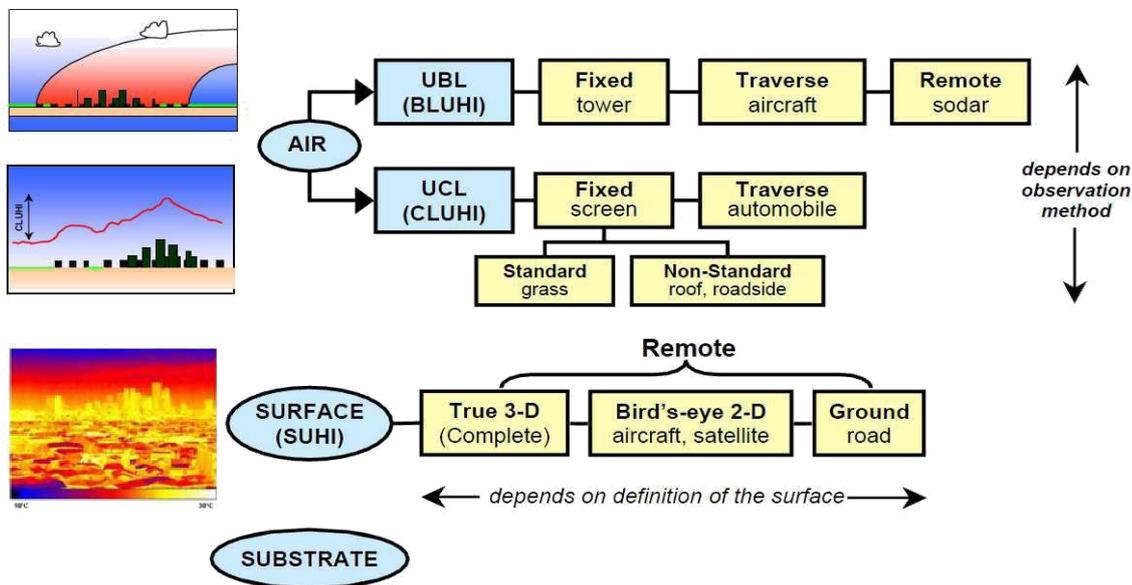


Fig. 4 Tipologie di UHI in relazione ai diversi metodi di misurazione (Oke, 2003)

1.3 Cause e fattori influenti

La causa principale dell'effetto isola di calore urbano risiede nell'alterazione da parte dell'uomo della superficie terrestre. Tuttavia, l'intensità del fenomeno è influenzata dalla posizione geografica, dalle ore della giornata considerate e dalle condizioni meteorologiche (la velocità del vento e la nuvolosità alterano sia la turbolenza atmosferica che l'irraggiamento solare (Oke, 1997)). La stagione estiva e la notte contribuiscono nella maggior parte delle città esaminate a massimizzare l'UHI, mentre le caratteristiche topografiche e la presenza di corpi idrici possono modificare il regime dei venti locali (Akbari, 2008). Le modifiche antropiche del territorio sono considerate variabili controllabili e cause principali dell'effetto isola di calore nonché dipendenti dalla geometria urbana, dalle proprietà termiche e radiative delle superfici, dalla riduzione della vegetazione e dai processi energetici che soddisfano i bisogni della popolazione (Rizwan, 2008).

1.3.1 Le variabili controllabili

1.3.1.1 *Vegetazione ed aree verdi*

Un terreno coperto da vegetazione contribuisce all'abbassamento della temperatura epidermica urbana grazie all'evapotraspirazione e, nel caso di alberi ad alto fusto, all'ombreggiamento.

L'evapotraspirazione indica simultaneamente due processi:

- L'evaporazione;
- La traspirazione vegetale.

Il primo processo esprime il passaggio allo stato gassoso dell'acqua presente sulle superfici, il secondo invece il trasferimento nell'atmosfera attraverso gli stomi fogliari dell'acqua precedentemente assorbita dalle radici.

La quasi assenza dell'evapotraspirazione è la causa principale dell'aumento delle temperature diurne nelle città, poiché la dispersione dell'energia viene effettuata principalmente tramite calore sensibile.

Nelle aree urbane pertanto il rapporto di Bowen β (rapporto tra il flusso di calore sensibile e latente) può assumere valori elevati, vicini a 5, contrariamente a quanto accade nelle aree rurali, nelle quali

0.5 è un valore tipico (Taha, 1997). Il valore di β tuttavia è molto variabile e dipende anche dalle precipitazioni così come dall'impermeabilità delle superfici urbane.

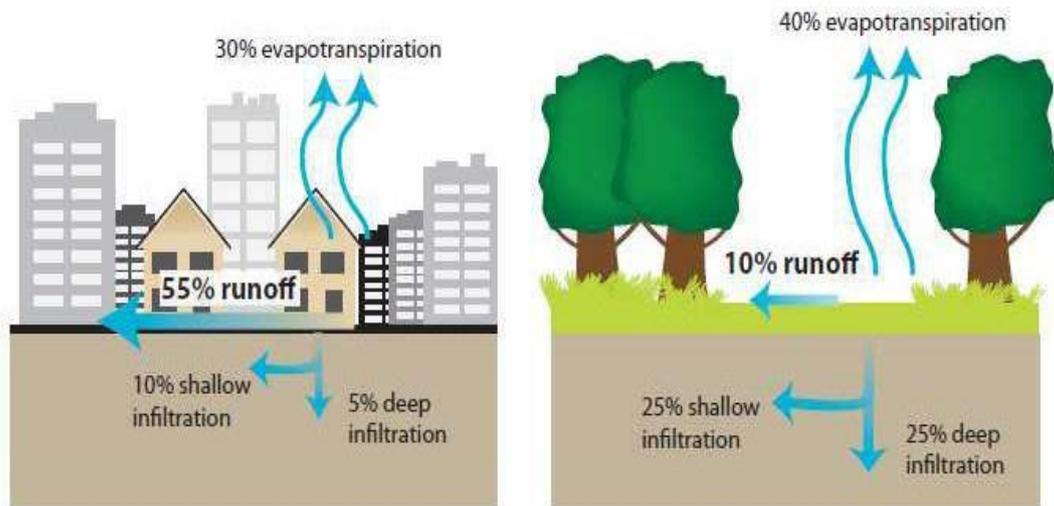


Fig. 5 L'impermeabilità delle superfici urbane determina una minore umidità disponibile per i processi di evapotraspirazione (Akbari, 2008)

1.3.1.2 caratteristiche radiative dei materiali ed inquinamento

Le differenti proprietà radiative dei materiali urbani rispetto alle zone rurali e la presenza di inquinamento cittadino sono fattori che modificano i flussi radiativi superficiali. È opportuno scomporre la radiazione netta Q^* , termine presente nell'equazione del bilancio energetico, nelle sue componenti:

$$Q^* = K_{\uparrow} + K_{\downarrow} + L_{\uparrow} + L_{\downarrow}$$

Si distingue, in base alla lunghezza d'onda, tra la radiazione solare (ad onda corta) K e la radiazione infrarossa (ad onda lunga) L entrambe ulteriormente scomposte in due componenti, una verso l'alto (dal suolo verso l'atmosfera) e l'altra verso il basso (dall'atmosfera verso la superficie).

Il significato dei simboli utilizzati risulta visibile in figura 6:

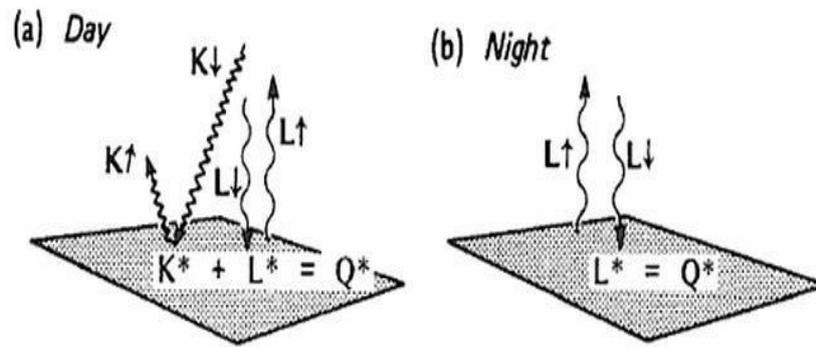


Fig. 6 Direzione dei flussi radiativi di giorno (a) e di notte (b) (Oke, 1997)

- $K\uparrow$ =radiazione solare riflessa dalla superficie;
- $K\downarrow$ =radiazione solare incidente (diretta dal sole e diffusa dall'atmosfera);
- $L\uparrow$ =radiazione infrarossa uscente (riflessa ed emessa dalla superficie);
- $L\downarrow$ =radiazione infrarossa diffusa (dall'atmosfera verso la superficie).

È tuttavia possibile modificare l'equazione precedente introducendo il concetto di albedo, utilizzando la legge di Stefan-Boltzmann e la legge di Kirchoff.

Il termine albedo indica la frazione di radiazione incidente che viene riflessa da una superficie, la legge di Stefan-Boltzmann esprime la potenza emessa da un corpo con una temperatura T ed emissività ϵ , mentre la legge di Kirchoff esprime l'uguaglianza tra emissività e coefficiente di assorbimento ad una data lunghezza d'onda. L'equazione modificata diventa in seguito alle sostituzioni:

$$Q^* = -a K \downarrow + K \downarrow - \epsilon_{IR} \sigma T^4 - (1 - \epsilon_{IR}) L \downarrow + L \downarrow$$

$$Q^* = (1 - a) K \downarrow - \epsilon_{IR} \sigma T^4 + \epsilon_{IR} L \downarrow$$

Dove a rappresenta l'albedo, ϵ_{IR} coefficiente di emissività nell'infrarosso, σ la costante di Stefan-Boltzmann e T la temperatura della superficie.

L'individuazione dei termini che costituiscono la radiazione netta Q^* rende ora possibile analizzare le variazioni in un contesto cittadino. La modifica al bilancio radiativo dipende innanzitutto dalle caratteristiche radiative delle superfici, i materiali presenti in città sono infatti caratterizzati da un'albedo inferiore rispetto alle campagne e quindi da un coefficiente di assorbimento della radiazione solare maggiore, a volte anche del 50% (M., 2011). Nel caso di vegetazione spontanea o

coltivata, l'albedo è dell'ordine del 0.25-0.3 mentre nelle città il valore è mediamente più basso e può raggiungere 0.05 nel caso di superfici asfaltate (Figura 7). La superficie urbana assorbe quindi più energia rispetto alle zone rurali e raggiunge temperature epidermiche superiori, che consentono una maggiore emissione di radiazione infrarossa $L\uparrow$.

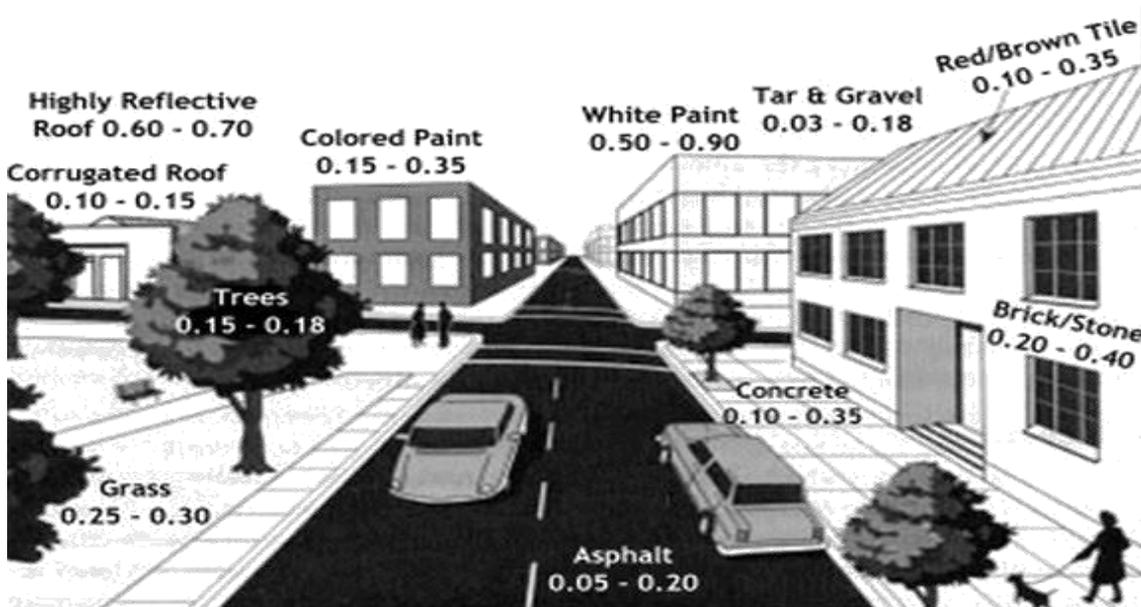


Fig. 7 Valori tipici di albedo per i più noti materiali delle aree urbane

Un ulteriore fattore che contribuisce all'alterazione del bilancio è la presenza nell'aria di inquinanti, responsabili di un "effetto serra urbano"; un maggior assorbimento da parte dell'atmosfera della radiazione infrarossa terrestre che viene nuovamente irradiata (aumento di $L\downarrow$). In aggiunta la presenza di aerosol riduce mediamente del 2-10% la radiazione solare incidente $K\downarrow$, nonostante la diminuzione osservata nella città di Hong Kong sia stata del 33% (Arnfield, 2003).

La diminuzione dell'albedo delle superfici urbane è quindi compensata dalla diminuzione della radiazione solare incidente $K\downarrow$ provocata dagli inquinanti atmosferici, mentre l'aumento della radiazione infrarossa emessa dall'atmosfera $L\downarrow$ viene bilanciata dall'aumento dell'emissione superficiale causata dalle maggiori temperature. Nella maggior parte dei casi per tali motivi la differenza di radiazione netta Q^* tra zone urbane e rurali non supera il 5% (Oke, 1997).

1.3.1.3 Geometria e canyon urbani

Il bilancio radiativo esaminato nel paragrafo precedente risulta valido se applicato ad una superficie piana, tuttavia tale condizione non è quasi mai verificata nell'ambiente urbano perchè la radiazione netta è dipendente dalla disposizione geometrica degli edifici, che è in grado di modificare i percorsi della radiazione. Sebbene ogni città presenti un proprio assetto geometrico, è possibile individuare un'unità geometrica urbana presente in maniera diffusa: il canyon urbano. Il canyon è formato tipicamente da due edifici adiacenti e da una strada situata tra di essi (Figura 8).

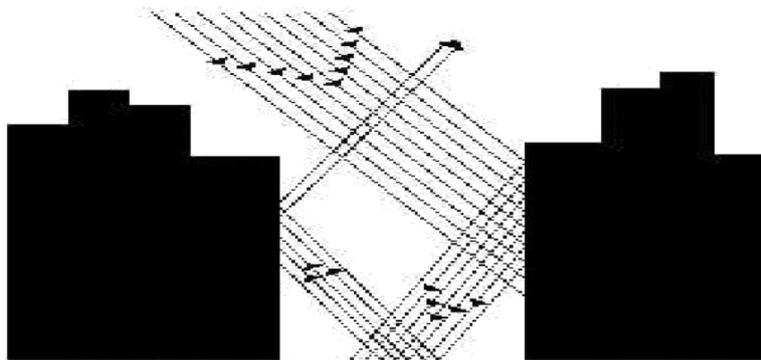


Fig. 8 Le riflessioni e gli assorbimenti multipli in un canyon urbano incrementano l'albedo del sistema

La geometria del canyon influenza il bilancio energetico urbano in vari modi:

- Aumenta la superficie esposta ai processi di scambio;
- Complica l'ingresso della radiazione solare;
- Determina un'interazione tra le superfici che lo compongono;
- Limita la capacità di dispersione della radiazione infrarossa ad onda lunga e limita la turbolenza dell'aria.

I canyon urbani catturano infatti una maggiore quantità di radiazione solare, intrappolata dalle numerose riflessioni multiple che i raggi solari subiscono da parte delle pareti dei palazzi e del fondo stradale (Figura 9). È soprattutto a causa di tale fenomeno, noto appunto come effetto canyon, che l'isola di calore si conserva anche nelle ore notturne. Di notte il raffreddamento dell'aria che ristagna entro i canyon è molto più lento che nelle adiacenti aree rurali perché l'energia infrarossa irraggiata nell'ambiente dalle superfici che delimitano il corridoio stradale, anziché disperdersi liberamente nello spazio, viene in gran parte catturata e più volte riflessa dagli edifici che si fronteggiano ai lati opposti della strada (Oke, 1997).

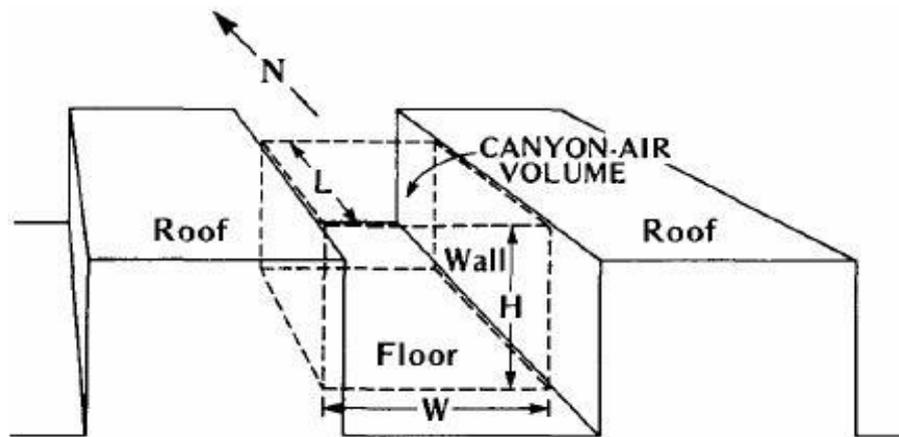


Fig. 9 Rappresentazione schematica di un canyon urbano (Oke, 1997)

Naturalmente non tutti i canyon urbani influenzano allo stesso modo gli scambi energetici e le temperature.

I parametri che caratterizzano la geometria dei canyon urbani sono:

- L'orientamento rispetto ai punti cardinali;
- Il rapporto H/W tra l'altezza e la larghezza della struttura;
- I fattori di vista (un rapporto variabile tra 0 e 1 che esprime la quantità di radiazione intercettata da una superficie rispetto a quella emessa da un'altra).

1.3.1.4 Elementi di rugosità

La geometria degli edifici urbani influenza non solo il percorso della radiazione ma anche il profilo del vento.

Le strutture urbane sono infatti degli ostacoli aerodinamici, che riducono l'asportazione del calore quanto più sono di dimensioni rilevanti e posti a distanza ravvicinata.

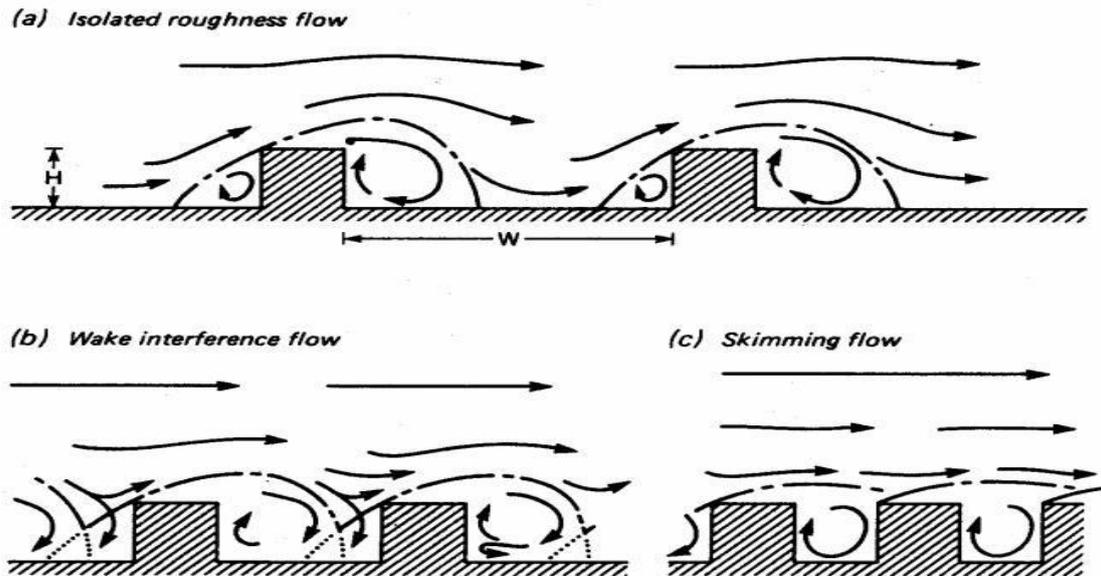


Fig. 10 Regimi fluidodinamici in ambiente urbano in funzione dei rapporti fra l'altezza H degli edifici e la distanza W rispetto alla direzione del vento (Oke, 1997)

1.3.1.5 Caratteristiche termiche dei materiali

Gli elementi che costituiscono l'edilizia urbana sono caratterizzati da una maggiore conducibilità termica k e da una maggiore capacità termica C . Si definisce ammettenza termica o inerzia termica μ il parametro che combina queste due proprietà:

$$\mu = \sqrt{kC}$$

e rappresenta una misura della risposta termica di una superficie ad un dato flusso di calore. Superfici urbane contraddistinte da alti valori di ammettenza termica μ ricevono calore (da immagazzinare o da emettere nell'ambiente circostante) con relativa facilità e subiscono moderate variazioni di temperatura superficiale (Oke, 1997). L'elevato valore di μ , caratterizzante le aree metropolitane, determina una variazione nel bilancio energetico superficiale poiché la quota di

energia immagazzinata ΔQS è considerevolmente maggiore rispetto alle zone rurali. Poiché la misurazione non risulta determinabile con precisione se ne effettua una stima almeno del doppio nelle città (Akbari, 2008).

1.3.1.6 Il calore antropogenico

Per calore antropogenico si intende ciò che deriva dalle attività umane e dai consumi energetici che esse comportano. Il QF (calore antropogenico) è supplementare al bilancio energetico urbano e lo si può scomporre in tre componenti:

- Il calore generato dai mezzi di trasporto QFV;
- Il calore proveniente da fonti stazionarie (come abitazioni o industrie) QFH;
- Il calore generato dal metabolismo umano e animale QFM (Arnfield, 2003).

$$QF=QFV+QFH+QFM$$

2 BENESSERE TERMOIGROMETRICO

2.1 Aspetti generali

Il benessere termoigrometrico è la sensazione termica (di caldo o freddo) che le persone provano all'interno di un ambiente.

Le grandezze che ci permettono di effettuarne una stima sono sei, quattro relative alle condizioni ambientali:

- La temperatura dell'aria;
- La temperatura media radiante delle superfici che delimitano l'ambiente;
- L'umidità relativa dell'aria;
- La velocità dell'aria;

e due caratterizzanti gli individui:

- L'attività fisica svolta dagli individui [attività metabolica $M = f(\text{attività})$];
- La resistenza termica dell'abbigliamento R'_{ab}

È opportuno precisare che le “condizioni di benessere” possono essere ottenute con molteplici e diverse combinazioni di queste grandezze e che si riferiscono ad ambienti in condizioni stazionarie per tempi superiori ai 15 minuti.

2.2 Il sistema termoregolatore dell'uomo

Le funzioni fisiologiche dell'uomo possono esplicitarsi correttamente solo in un intervallo di temperatura assai ristretto, centrato attorno a 37°C. Per poter mantenere pressoché costante la temperatura corporea, il corpo umano possiede un sofisticato sistema di “termoregolazione” nell'ipotalamo che, sulla base di stimoli provenienti dai termocettori, posti sulla superficie della pelle, mette in azione strategie compensatrici.

È proprio questo sistema che consente all'uomo di adattarsi e sopravvivere in una vasta gamma di climi, dall'equatore alle latitudini più elevate. Per inquadrare razionalmente questa problematica si premetteranno alcune nozioni generali. Come ben noto, nel corpo umano si verificano con continuità una serie di processi chimici che trasformano le sostanze reagenti (cibo + ossigeno) in altre sostanze (cataboliti + anidride carbonica). Dal punto di vista energetico si ha conversione di

energia potenziale chimica in energia meccanica e in calore. La potenza energetica M messa in gioco è detta metabolismo (ad esempio, per una persona normale in condizioni di riposo, $M \approx 100[W]$). Nel caso di attività fisiche particolarmente intense, M può raggiungere valori pari a circa $1000[W]$. I meccanismi adottati dal corpo umano per controllare la temperatura corporea sono svariati, ad esempio, per evitare un decremento:

- Si può ridurre il calore disperso verso l'esterno, diminuendo la temperatura della superficie corporea t_s con una vasocostrizione periferica della circolazione sanguigna;
- È possibile aumentare M modificando il comportamento (ad esempio incrementando l'attività fisica, modificando l'abbigliamento o spostandosi in un ambiente meno esposto). Il metabolismo M può essere incrementato anche tramite un tremore incontrollato (brividi).

Per evitare, invece, un incremento della temperatura corporea:

- Si può aumentare il calore disperso verso l'esterno con un meccanismo opposto a quello precedentemente accennato e cioè la temperatura della superficie corporea t_s aumenta come conseguenza di una vasodilatazione della circolazione sanguigna periferica;
- Si può ancora, per aumentare il calore disperso, utilizzare un ulteriore ed efficiente meccanismo che prevede il rilascio sulla pelle, tramite ghiandole sudoripare, di acqua (sudore) che evapora a spese del flusso termico $E_t = gtr$ (dove r = calore di vaporizzazione dell'acqua alla temperatura corporea e g = portata di vapore).

In generale, si parla di benessere termoisometrico solo quando questi meccanismi fisiologici di controllo della temperatura non intervengono.

Da queste considerazioni di carattere generale si evince come per comprendere la complessità e la varietà di questa problematica sia opportuno prevedere le mosse dagli scambi di energia termica e di vapore d'acqua che si attuano tra il corpo umano e l'ambiente circostante.

2.3 Bilancio termico del corpo umano

2.3.1 Considerazioni introduttive

Gran parte dell'energia metabolica viene smaltita verso l'esterno sotto forma di calore. Per rendersi conto di quanto affermato possono risultare utili alcune considerazioni termodinamiche.

Si consideri il sistema "uomo" e il circostante sistema "ambiente".

Il sistema “uomo” dovrà conservare pressoché costante nel tempo il suo stato termodinamico e, pertanto, in un intervallo di tempo $\Delta\tau$ dovrà essere $\Delta S \cong 0$

Il Principio fornisce:

$$\Delta S \cong 0 = \frac{Q}{T} + \Delta S_s$$

- Q =calore scambiato nell’intervallo di tempo $\Delta\tau$;
- T =temperatura assoluta cui si scambia calore;
- ΔS_s =variazione di entropia per irreversibilità interne nel tempo $\Delta\tau$.

Poiché nel sistema “uomo” si verificano processi irreversibili, necessariamente sarà $S_s > 0$ e quindi per $T > 0$ dovrà essere $Q < 0$. Pertanto, l’uomo dovrà cedere calore all’esterno, cioè dovrà smaltire verso l’ambiente un flusso termico:

$$\varphi = \Delta Q T < 0$$

Si fornisce il bilancio energetico del sistema “uomo” in figura 11. A regime, il metabolismo M (flusso energetico metabolico) dovrà risultare eguale alla somma tra il flusso termico suddetto e la potenza meccanica fornita $P > 0$.

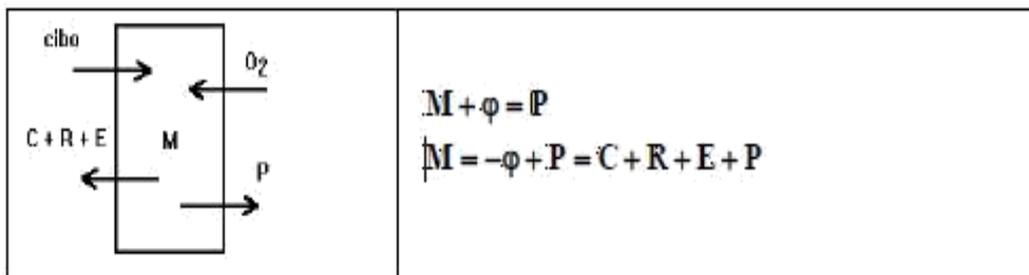


Fig. 11 Bilancio energetico sistema uomo

Dove:

- M =potenza messa in gioco dall'attività metabolica all'interno del corpo[W];
- P =potenza meccanica fornita[W];
- C =flusso termico fornito all'esterno per convezione[W];
- R =flusso termico all'esterno per irraggiamento corpo-oggetti[W];
- E =flusso termico impegnato per evaporare acqua[W].



Fig. 12 Scambi termici uomo-ambiente

Nell'equazione di bilancio, P è positivo se svolto dal corpo e i termini C , R ed E sono riferiti all'esterno. Si può anticipare che i termini C ed R potranno risultare, a seconda dei casi, sia positivi (flussi forniti all'esterno) che negativi, mentre E è sempre positivo. L'ulteriore possibile scambio termico per conduzione attraverso la pianta dei piedi risulta assai piccolo e viene pertanto trascurato. Se la potenza M non è uguale alla potenza totale scambiata con l'esterno (meccanica P + termica $(C+R+E)$), si avrà nel corpo un accumulo (positivo o negativo) d'energia interna, con conseguente aumento o diminuzione nel tempo della temperatura corporea.

2.3.2 La potenza metabolica M

Per tener conto delle differenti corporature degli individui si usa riferire tutti i termini dell'equazione di bilancio all'unità di superficie corporea nuda. Anziché alla potenza metabolica $M[W]$ si farà riferimento alla potenza metabolica specifica e cioè al rapporto $M/A[W/m^2]$. Una stima attendibile dell'estensione del corpo umano è fornita dalla seguente espressione (area di Dubois):

$$A=0.202x(m_b)^{0.425} x(h_b)^{0.725}$$

dove:

- A =superficie corpo umano nudo $[m^2]$;
- m_b =massa $[kg]$;
- h_b =altezza $[m]$.

La potenza metabolica specifica può essere distinta in due componenti:

- Potenza metabolica basale: esprime la potenza messa in gioco per il solo funzionamento degli organi vitali. Si misura nel soggetto a riposo fisico e mentale; equivale a circa $43W/m^2$;
- Potenza metabolica addizionale: funzione unicamente dell'attività svolta, dipendente cioè dalle condizioni di lavoro dell'organismo.

La potenza metabolica specifica M/A oltre che in unità SI $[W/m^2]$ viene anche comunemente espressa nell'unità incoerente met. Vale la relazione: $1met=58.2W/m^2$. Indicativamente, 1 met equivale alla potenza metabolica specifica di un individuo sano in posizione seduta ed a riposo (convenzionalmente $A=1.8m^2$, per persona alta m 1.70 e pesante Kg 70). La potenza metabolica aumenta al crescere dell'attività fisica e/o intellettuale (figura 13), e può essere misurata direttamente, valutando il consumo d'ossigeno, o desunta dalla figura 14.



Fig. 13 Valori di met per attività fisica e/o intellettuale

ATTIVITÀ	POTENZA METABOLICA	
	[W/m ²]	[met]
<i>A riposo</i>		
durante il sonno	40	0,7
sdraiato	46	0,8
seduto	58	1,0
in piedi, rilassato	70	1,2
<i>In cammino (in piano)</i>		
0,89 m/s	115	2,0
1,34 m/s	150	2,6
1,79 m/s	220	3,8
<i>Sedentaria</i>		
lettura	55	0,9
scrittura	60	1,0
in piedi, lavoro d'archivio	80	1,4
<i>Artigianale</i>		
falegname	100-175	1,7-3,0
muratore	110-160	1,9-2,8
<i>Grafica</i>		
disegnatore	115	2,0
<i>Varie</i>		
ginnastica	175-235	3,0-4,0
tennis	210-270	3,6-4,6

POSIZIONE DEL CORPO	POTENZA METABOLICA [W/M ²]
seduto	10
inginocchiato	20
in piedi	25
in piedi, curvato	30

TIPO DI LAVORO	POTENZA METABOLICA [W/M ²]
con le mani	30
con un braccio	55
con ambo le braccia	85
con il tronco	190

Fig. 14 Valori di met in funzione del tipo di attività desunti dalle normative tecniche UNI EN ISO 7730 2006, UNI EN ISO 9920 2009

Oltre al livello dell'attività metabolica M occorre tener conto dell'abbigliamento che costituisce una resistenza termica posta sopra la pelle. Si introduce quindi la resistenza termica specifica dell'abbigliamento R'_{ab}

La resistenza R'_{ab} [$m^2 K/W$], oltre che nelle consuete unità SI viene anche espressa attraverso un'altra unità non coerente detta "clo".

Sussiste la relazione:

$$1\text{clo}=0.155\text{m}^2\text{K/W}.$$

Tipo di abbigliamento	Resistenza termica [m ² K/W]	Resistenza termica [clo]
Persona nuda	0	0
Calzoncini	0.015	0.1
Vestiaro tipico tropicale	0.045	0.3
Vestiaro leggero estivo	0.08	0.5
Vestiaro leggero da lavoro	0.11	0.7
Vestiaro invernale da interno	0.16	1.0
Vestiaro invernale da esterno	0.23	1.5

Fig. 15 Resistenza termica per abbigliamento tipo (UNI EN ISO 7730 2006, UNI EN ISO 9920 2009)

2.3.3 La potenza meccanica scambiata con l'esterno P

È opportuno osservare che in alcuni casi una piccola parte della potenza metabolica M può ritrovarsi in potenza meccanica; per esempio, un individuo che solleva un oggetto in un certo tempo trasferisce all'esterno una potenza meccanica $P > 0$ [W]. Si usa definire, per le diverse attività di un individuo, un rendimento meccanico η dato dal rapporto tra la potenza meccanica P e la potenza metabolica M, ovvero:

$$\eta = \frac{P}{M}$$

L'equazione di bilancio del corpo umano potrà quindi scriversi:

$$M - P = M(1 - \eta) = C + R + E \text{ [W]}$$

dove il termine $M(1 - \eta)$ rappresenta il flusso termico che, in condizioni di regime, viene ceduto all'ambiente circostante.

Il rendimento meccanico del corpo umano è, ad ogni modo, molto basso, oscillando tra 0 e 0.2, ed è leggermente crescente al crescere della potenza meccanica.

Il corpo umano può essere quindi considerato come una macchina termica a basso rendimento: e cioè per ottenere una potenza meccanica P deve mettere in gioco la potenza metabolica M che è a sua volta ottenuta da una "combustione controllata" del "cibo". La potenza metabolica M viene in piccola percentuale trasformata nella potenza meccanica P e, in gran parte, riversata nell'ambiente, nuovamente, sotto forma della potenza termica (C+R+E).

2.3.4 Il flusso termico scambiato per convezione C

Il flusso termico scambiato per convezione tra la superficie esterna del corpo umano più o meno abbigliato con l'aria ambiente (termine C) può considerarsi somma di due termini:

- L'uno dovuto al fenomeno della respirazione, "Cresp", (l'aria si riscalda per convezione termica all'interno dei polmoni);
- L'altro, "Cconv", dovuto allo scambio per convezione tra la superficie esterna del corpo umano più o meno abbigliato.

L'entità dello scambio termico C dipenderà, quindi, dalle seguenti variabili:

- Temperatura dell'aria t_a ;
- Temperatura media della superficie esterna del corpo (superficie abbigliata) t_{ab} ;
- Tipo di vestiario e cioè sua resistenza termica R'_{ab} tra la pelle a temperatura t_s e la superficie esterna degli abiti t_{ab} ;
- Velocità relativa dell'aria w_a .

In riferimento alle sole grandezze caratteristiche dell'ambiente risulta: $C=f(t_a, w_a)$.

Per una persona seduta, è importante la velocità media dell'aria attorno ad essa, se invece essa è in movimento, è essenziale la velocità relativa dell'aria rispetto al corpo.

L'entità di questo flusso termico può, come già osservato, essere regolata dal sistema di termoregolazione del corpo umano, attraverso un innalzamento (o un abbassamento) della temperatura media cutanea t_s .

2.3.5 Il flusso termico scambiato per irraggiamento R

Il flusso termico scambiato per irraggiamento tra la superficie esterna del corpo umano più o meno abbigliato e l'ambiente circostante può essere valutato sulla base di quanto noto dalla trasmissione del calore.

In particolare, una persona in un ambiente può essere considerata come un corpo piccolo in un grande ambiente. Si ricorda che, poiché le varie superfici delimitanti l'ambiente sono caratterizzate da diverse temperature, si usa introdurre la temperatura media radiante delle pareti t_{mr} definita come la temperatura delle pareti di un ambiente virtuale, per il quale tale temperatura sia uniforme ed in cui il soggetto scambierebbe per irraggiamento la stessa quantità di flusso termico che scambia nell'ambiente reale. La temperatura media radiante assoluta T_{mr} , dipende dalle temperature superficiali assolute elevate alla quarta potenza pesate con i relativi fattori di vista, ad esempio, per una persona (indice p) all'interno di un locale delimitato da due superfici (1 e 2) a temperature T_{s1} e T_{s2} con fattori di vista F_{p1} e F_{p2} risulta:

$$T_{mr}^4 = \sqrt[4]{F_{p1} \cdot T_{s1}^4 + F_{p2} \cdot T_{s2}^4}$$

e, con buona approssimazione, anche:

$$t_{mr} \cong F_{p1} \cdot t_{s1} + F_{p2} \cdot t_{s2}$$

In altre parole, la temperatura media radiante consente di assimilare un qualunque ambiente ad uno equivalente con però tutte le pareti isoterme (temperatura t_{mr}).

L'entità dello scambio termico R dipenderà, quindi, dalle seguenti variabili:

- Temperatura media radiante delle pareti t_{mr} ;
- Temperatura media della superficie esterna del corpo (superficie abbigliata) t_{ab} ;
- Tipo di vestiario e cioè sua resistenza termica R'_{ab} tra la pelle a temperatura t_s e la superficie esterna degli abiti t_{ab} ;
- Emissività della superficie abbigliata (in genere $\epsilon \cong 0.95$).

In riferimento alle sole grandezze caratteristiche dell'ambiente, risulta $=f(t_{mr})$.

2.3.6 Il flusso termico dovuto ad evaporazione E

Il flusso termico E ceduto per evaporazione cutanea può considerarsi come somma di tre diversi contributi:

- E_r dovuto alla respirazione: l'aria entra nei polmoni relativamente secca e ne fuoriesce con umidità assoluta maggiore;
- E_d dovuto all'acqua che evapora dal corpo umano, passando (diffondendo) attraverso la pelle (si parla, in questo caso, di un processo di diffusione di vapore);
- E_t dovuto al fenomeno della traspirazione che si manifesta attraverso il ricoprimento della pelle da parte di un film d'acqua (sudore), la cui emissione da parte d'opportune ghiandole sudoripare è regolata dal sistema di termoregolazione del corpo umano.

Per quanto riguarda la dipendenza di E dai parametri ambientali, si può osservare che E dipenderà sia dalla temperatura dell'aria t_a che dalla sua umidità relativa i_a :

$$E=f(t_a, i_a)$$

Il flusso termico R+C, scambiato dal corpo umano attraverso i meccanismi dell'irraggiamento e della convezione, viene detto flusso sensibile, in quanto ad esso può corrispondere un'effettiva variazione della temperatura dell'ambiente circostante.

Il flusso termico E, messo in gioco per l'evaporazione di acqua interna, viene detto, invece, flusso latente in quanto esso si manifesta solo attraverso una produzione di vapore cui non corrisponde una variazione misurabile della temperatura dell'ambiente.

In conclusione, il flusso termico complessivo:

$$\varphi_{Tot} = R + C + E \text{ (sensibile più latente)}$$

dipende, per ogni condizione d'attività fisica e modalità d'abbigliamento, da quattro parametri ambientali, influenzanti l'equilibrio termico dell'uomo, ossia la temperatura dell'aria, la temperatura media radiante, la velocità e l'umidità dell'aria.

Al fine di ridurre il numero di variabili, l'influenza della temperatura dell'aria e della temperatura media radiante possono essere riassunte in una sola grandezza detta temperatura operativa t_o :

$$R + C = \alpha_{irr} \cdot A \cdot (t_{ba} - t_{mr}) + \alpha_c \cdot A \cdot (t_{ab} - t_a)$$

ove ovviamente $\alpha_i = \alpha_{irr} + \alpha_c$

Se ora si impone:

$$C = \alpha_i \cdot A \cdot (t_{ab} - t_o)$$

risulta possibile ricavare il valore cercato della temperatura operativa:

$$t_o = \frac{\alpha_{irr} \cdot t_{mr} + \alpha_c \cdot t_a}{\alpha_i}$$

In molti casi pratici risulta che $\alpha_{irr} \cong \alpha_c$ per cui risulta anche: $t_o \cong (t_{mr} + t_a) / 2$

2.4 Relazione di Fanger

La condizione di benessere termoigrometrico di una persona corrisponde ad una condizione di "neutralità termica" nella quale l'individuo non avverte né sensazione di caldo né di freddo e cioè ad una condizione che veda il "non intervento" dei meccanismi fisiologici deputati al controllo della temperatura corporea. Ad esempio, se una persona controlla la sua temperatura corporea sudando vistosamente o rabbrivendo, difficilmente si potrà parlare di "benessere termoigrometrico". Ovviamente, la parziale soggettività delle sensazioni introduce elementi di imprevedibilità per cui

una valutazione sufficientemente oggettiva delle condizioni di benessere dovrà far riferimento ad indagini di tipo statistico. Se i singoli termini che compaiono nell'equazione di bilancio termico del corpo umano ($M(1-\eta)=C+R+E$) vengono espressi in forma estesa (e cioè in funzione del tipo di attività svolta, dell'abbigliamento e delle condizioni ambientali) si può scrivere un'equazione del tipo:

$$f(M, \eta, R'_{ab}, t_{mr}, t_a, i_a, w_a, t_s, E_t) = 0$$

Nell'equazione di bilancio ottenuta (non riportata in forma estesa) compaiono esplicitamente le seguenti grandezze:

- Temperatura dell'aria, t_a ;
- Umidità relativa dell'aria, i_a ;
- Velocità dell'aria, w_a ;
- Temperatura media radiante, t_{mr} ;
- Attività svolta: M, η ;
- Abbigliamento, R'_{ab} ;
- Temperatura della pelle, t_s ;
- Potenza termica dispersa per traspirazione, E_t

Si può precisare che per ogni condizione di attività, ambientale e di abbigliamento, il sistema di termoregolazione agisce variando sia t_s che E_t per soddisfare il bilancio termico del corpo ed evitare quindi variazioni inaccettabili della temperatura corporea. È importante evidenziare che il soddisfacimento del bilancio energetico non implica, come già osservato, condizioni di benessere termoisometrico.

Sulla base di esperienze condotte su gran numero di soggetti in condizione di dichiarato benessere termico, Fanger ha potuto stabilire che su base statistica e in condizioni di dichiarato benessere le grandezze t_s ed E_t (controllate dal sistema fisiologico di termoregolazione) non sono indipendenti dall'attività svolta ma possono essere correlate in base a due relazioni del tipo:

$$t_s = f(M/A, \eta)$$

$$E_t = f'(M/A, \eta)$$

Se queste relazioni vengono inserite nel bilancio termico del corpo si possono eliminare dall'equazione di bilancio t_s ed E_t per ottenere la ben nota equazione del benessere di Fanger. L'equazione di Fanger risulta pertanto esprimibile nella forma:

$$f(M/A, \eta, R'_{ab}, t_{mr}, t_a, i_a, w_a) = 0$$

L'equazione lega tra loro sei variabili: due legate al soggetto (abbigliamento e attività), quattro ambientali (temperatura e velocità dell'aria, umidità dell'aria e temperatura media radiante). Ad esempio, fissati M/A , η , R'_{ab} , è possibile determinare quali combinazioni delle grandezze (t_a, t_{mr}, i_a, w_a) assicurino condizioni di benessere, che, ovviamente sono infinite.

In genere (almeno per umidità comprese tra il 30 ed il 70%) l'influenza dell'umidità relativa dell'aria sul benessere è ridotta. La soluzione algebrica dell'equazione si presenta laboriosa, per cui in genere si ricorre ad opportuni diagrammi.

A titolo di esempio si riportano alcuni diagrammi ove, trascurando l'effetto della i_a , sono riportate le linee di benessere, cioè linee che soddisfano la relazione di Fanger.

Su ciascun diagramma le linee sono tracciate per cinque differenti velocità dell'aria.

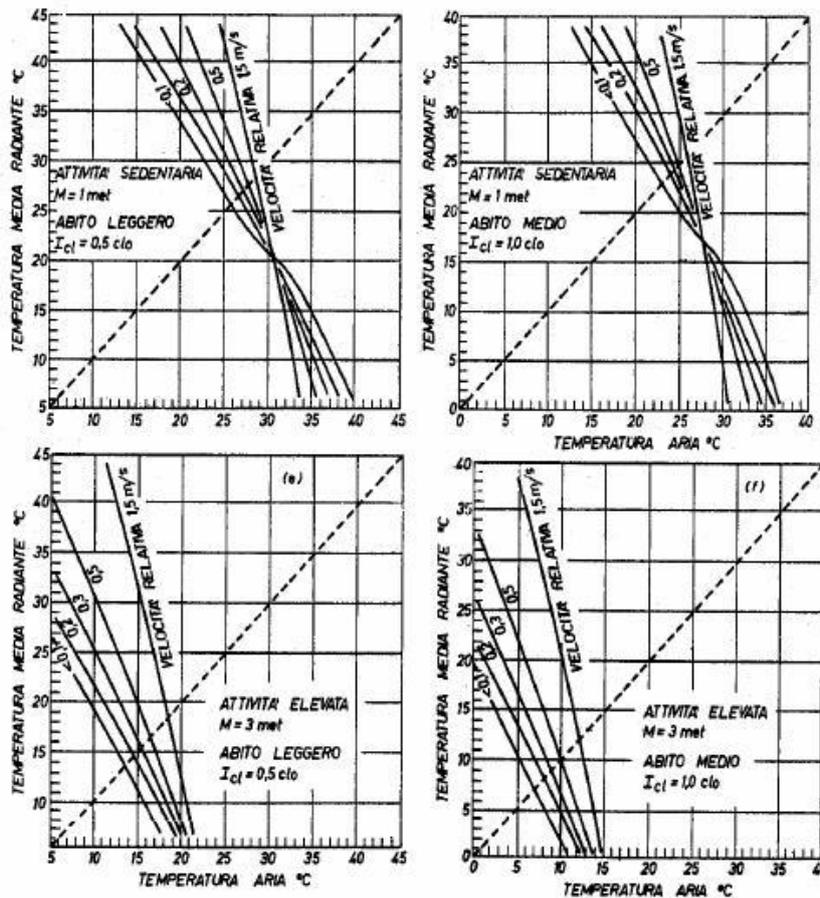


Fig. 16 Diagrammi delle linee di benessere di Fanger

I diagrammi mettono in evidenza come la temperatura media radiante, nel caso di basse velocità dell'aria, assume quasi la stessa importanza della temperatura dell'aria ambiente. Pertanto, con riferimento alle condizioni invernali, tanto minore sarà la temperatura media delle pareti, tanto maggiore, a parità d'abbigliamento, dovrà essere la temperatura dell'aria.

2.5 Gli indici globali di benessere PMV e PPD

La sensazione termica di un individuo viene valutata attraverso il calcolo del PMV.

Il Predicted Mean Vote, introdotto dalla norma ISO7730, rappresenta il ‘voto medio di sensazione termica che ci si può aspettare da un campione sufficientemente ampio di persone che si trovano nello stesso ambiente’. Tale valore viene espresso sulla base di una scala a 7 campi (figura 17).

Voto	Sensazione psicofisica
+3	Molto caldo
+2	Caldo
+1	Leggermente caldo
0	Neutrale
-1	Leggermente freddo
-2	Freddo
-3	Molto freddo

Fig. 17 Voto medio previsto di sensazione termica del corpo (PMV) assegnato a diverse sensazioni psicofisiche

Secondo la normativa, si definiscono “condizioni di comfort” quelle caratterizzate da valori di PMV compresi tra [-0.5,+0.5] e “condizioni di neutralità termica” quelle con PMV = 0.

Mentre con la sigla PPD (Predicted Percentage of Dissatisfied) si intende la percentuale di insoddisfatti dell’ambiente termico e la sua natura intrinseca la rende correlabile al PMV, secondo la legge:

$$PPD = 100 - 95 \cdot e^{(-0.03353 \cdot PMV^4 - 0.2179 \cdot PMV^2)}$$

La parte restante del campione si trova in condizioni pressoché accettabili di benessere.

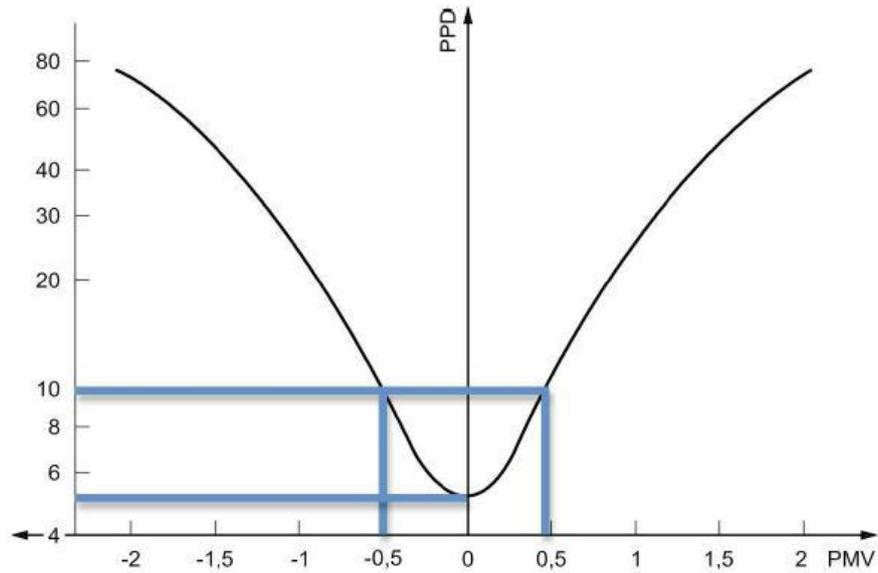


Fig. 18 Distribuzione statistica del PPD al variare del PMV (NOR)

La figura 18 mostra alcuni valori significativi della distribuzione statistica del PPD in funzione del PMV, da cui si nota che l'indice è pari al 5% per PMV=0 e arriva al 10% ai limiti dell'intervallo di benessere.

In figura 19 si può vedere invece la distribuzione dei singoli voti in funzione del voto medio. Tale risultato evidenzia come le risposte soggettive siano visibilmente diverse tra loro e come sia impensabile realizzare condizioni che siano di comfort per tutti.

PMV	PPD [%]	Percentuale prevista di persone, sulla base di un campione di 1300 votanti [%]		
		0	[-1, +1]	[-2, +2]
+2	75	5	25	70
+1	25	30	75	95
+0.5	10	55	90	98
0	5	60	95	100
-0.5	10	55	90	98
-1	25	30	75	95
-2	75	5	25	70

Fig. 19 Valori di PMV e PPD su campione di 1300 persone votanti

2.5.1 Calcolo del PMV

Il PMV può essere determinato con uno dei 3 seguenti metodi:

- Metodo analitico (NOR):

$$PMV = (0.303 \cdot e^{-0.036M} + 0.028) \cdot \left\{ \begin{aligned} & (M - W) - 3.05 \cdot 10^{-3} \cdot [5733 - 6.99 \cdot (M - W) - p_a] - 0.42 \cdot [(M - W) - 58.15] \\ & - 1.7 \cdot 10^{-5} \cdot M \cdot (5867 - p_a) - 0.0014 \cdot M \cdot (34 - t_a) \\ & - 3.96 \cdot 10^{-8} \cdot f_{cl} \cdot [(t_{cl} + 273)^4 - (\bar{t}_r + 273)^4] - f_{cl} \cdot h_c \cdot (t_{cl} - t_a) \end{aligned} \right\}$$

- Metodo grafico:

Per una più rapida determinazione dell'indice PMV, si può ricorrere ad un diagramma generale del benessere termico tracciato sperimentalmente, per valori di umidità relativa del 50%. La famiglia di curve a tratto continuo in figura 20 rappresenta le condizioni ottimali di neutralità termica (PMV=0) per valori di tasso metabolico M compresi tra 0.8 e 3.0 met, mentre le curve tratteggiate indicano lo scostamento accettabile della temperatura operativa (inteso come PMV compreso nell'intervallo [-0.5+0.5]) dal valore ottimale nella zona di benessere. Si può notare che lo scarto dalla temperatura operativa ottimale è minore per bassi valori del grado d'abbigliamento perché il corpo è meno coperto e quindi risente in maggior misura delle variazioni termiche (provocando facilmente disagio).

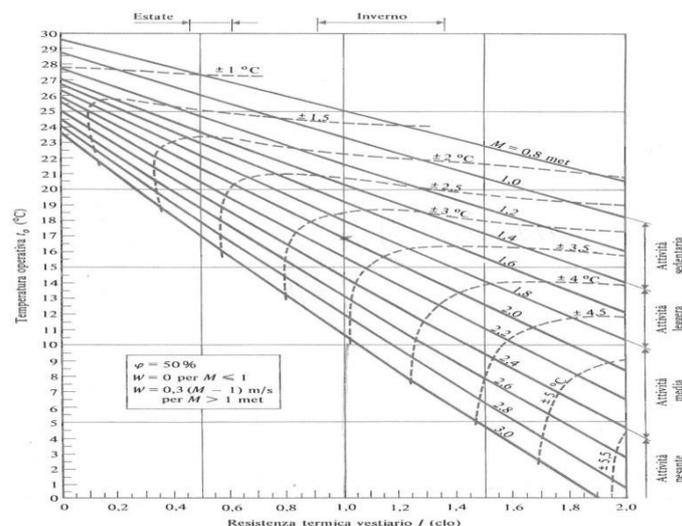


Fig. 20 Calcolo del PMV tramite metodo grafico

- Metodo tabellare:

La norma ISO 7730 fornisce delle tabelle per determinare il PMV in funzione della tipologia di vestiti, temperatura operativa e velocità relativa. I valori riportati all'interno di tali tabelle sono stati ricavati fissando una differenza tra la temperatura dell'aria e temperatura media radiante non superiore a 5°C e imponendo il tasso di umidità relativa dell'aria al 50%. L'accuratezza dei suddetti valori è dell'ordine di 0.1 PMV.

TIPO DI ABBIGLIAMENTO	RESISTENZA TERMICA I _{cl} [clo]	RESISTENZA TERMICA I _{cl} [m ² K/W]
Nudo	0.00	0.000
ABBIGLIAMENTO DA LAVORO		
Slip, tuta, calzini, scarpe	0.70	0.110
Slip, camicia, tuta, calzini, scarpe	0.80	0.125
Slip, camicia, pantaloni, grembiule, calzini, scarpe	0.90	0.140
Biancheria intima a maniche e pantaloni corti, camicia, pantaloni, giacca, calzini, scarpe	1.00	0.155
Biancheria intima a maniche e pantaloni lunghi, giacca termica, calzini, scarpe	1.20	0.185
Biancheria intima a maniche e pantaloni corti, camicia, pantaloni, giacca, giacca con imbottitura pesante, calzini, scarpe	1.40	0.220
Biancheria intima a maniche e pantaloni corti, camicia, pantaloni, giacca, giacca con imbottitura pesante, calzini, scarpe, berretto, guanti	2.00	0.310
Biancheria intima a maniche e pantaloni lunghi, pantaloni e giacca termica, Parka con imbottitura pesante, calzini, scarpe, berretto, guanti	2.55	0.395
ABBIGLIAMENTO GIORNALIERO		
Slip, maglietta, pantaloncini, calzini leggeri,	0.30	0.050
sandali		
Slip, camicia a maniche corte, pantaloni leggeri, scarpe	0.50	0.080
Slip, sottoveste, calze, abito, scarpe	0.70	0.105
Slip, sottoveste, maglietta, pantaloni, calzini, scarpe	0.70	0.110
Slip, maglietta, pantaloni, giacca, calzini, scarpe	1.00	0.155
Slip, calze, camicetta, gonna lunga, giacca, scarpe	1.10	0.170
Sottoveste con maniche e pantaloni lunghi, camicia, pantaloni, maglione con collo a V, giacca, calzini, scarpe	1.30	0.200
Sottoveste con maniche e pantaloni corti, camicia, pantaloni, gilet, giacca, cappotto, calzini, scarpe	1.50	0.230

Fig. 21 Valori per la determinazione del PMV in funzione della tipologia di vestiti (NOR)

3 LE TECNICHE DI MITIGAZIONE

Le tecniche di mitigazione maggiormente efficaci per contrastare il fenomeno dell'isola di calore prevedono la progettazione urbana utilizzando:

- “Tetti Freddi” (Cool roofs);
- “Pavimentazioni fredde” (Cool pavements);
- Aree verdi;
- “Tetti Verdi” (Green roofs).

Le prime due tecniche utilizzano dei materiali o dei rivestimenti “freddi” in grado di riflettere gran parte della radiazione solare, mentre le ultime due permettono una riduzione del calore sensibile tramite l'aumento del flusso di calore latente e grazie all'ombreggiamento prodotto dalle piante.

Di seguito si è scelto di trattare le suddette quattro tecniche di mitigazione ponendo il focus sulle pavimentazioni fredde.

3.1 Tetti freddi

I materiali da costruzione utilizzati nelle città influenzano in maniera significativa il bilancio energetico superficiale, infatti le superfici urbane assorbono la quota maggioritaria della radiazione solare ed infrarossa. Tale energia assorbita viene successivamente dissipata nell'ambiente attraverso i processi di raffreddamento radiativo e convettivo, andando così ad incrementare la temperatura atmosferica. Una riduzione delle temperature epidermiche delle coperture urbane produce dei benefici diretti ai singoli edifici e indiretti all'intero territorio urbano, poiché i tetti occupano il 20-25% della superficie totale urbana (secondo uno studio relativo ad alcune città americane (Shen, 2008)). È possibile raggiungere questo obiettivo promuovendo l'utilizzo di materiali in grado di riflettere una quota maggiore di radiazione rispetto a quelli tradizionali e caratterizzati da elevata emissività.

Le coperture urbane con queste caratteristiche vengono definite tetti freddi, dal momento che possono raggiungere temperature superficiali inferiori di 28-33°C rispetto ai materiali abituali e superiori di solo 6-11°C rispetto alla temperatura dell'aria.

Le leggi della fisica esprimono l'impossibilità di ottenere un'elevata emissività e riflessione alla stessa lunghezza d'onda. La realizzazione di tetti freddi è tuttavia possibile utilizzando materiali con

un comportamento selettivo, caratterizzati da eccellenti proprietà di riflessione della radiazione visibile e da un'elevata emissività nell'infrarosso. In figura 16, una copertura tradizionale (black roof), dotata di emissività elevata, può raggiungere temperature prossime agli 85°C durante una calda giornata estiva, poiché riflette solo il 5% della radiazione. La temperatura epidermica è leggermente inferiore nel caso di un tetto metallico, dotato di maggior albedo ma in grado di emettere solo il 25% della radiazione emessa da un corpo nero alla stessa temperatura. Al contrario godrà di una temperatura piuttosto inferiore un tetto avente elevati valori sia di albedo sia di emissività (tetto freddo).

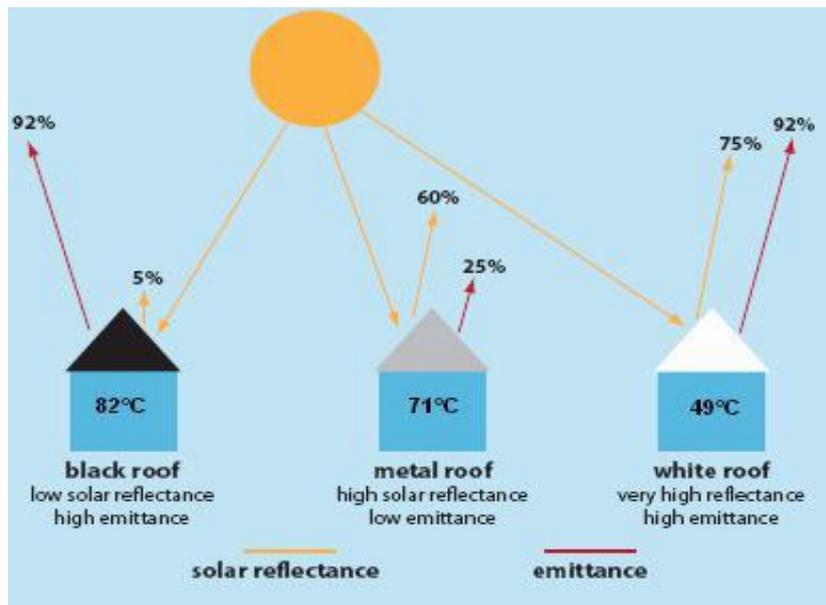


Fig. 22 Albedo, emissività e temperatura epidermica di equilibrio di differenti coperture urbane in una calda giornata estiva (Shen, 2008)

Entrambe le proprietà influenzano quindi la temperatura di equilibrio di una superficie ($T_{surface}$), che confrontata a parità di radiazione con quella di equilibrio di un materiale nero di riferimento (T_{black}) (albedo $a=5\%$ ed emissività $\epsilon=90\%$) e con quella di un materiale bianco standard (T_{white}) ($a=80\%$ e $\epsilon=90\%$) può essere utilizzata per valutare la capacità del materiale di mantenersi “freddo” attraverso “l’Indice di riflettanza solare” (Solar Reflectance Index, SRI) (On the Use of Cool Materials as a Heat Island Mitigation Strategy, 2007-2008).

$$SRI = \frac{T_{black} - T_{surface}}{T_{black} - T_{white}} \cdot 100$$

L’SRI combina in un unico parametro le proprietà radiative (albedo ed emissività).

Materiali con elevati valori di SRI sono in grado di raggiungere temperature di equilibrio inferiori rispetto a materiali aventi SRI minore.

3.2 Pavimentazioni fredde

Le superfici orizzontali cittadine sono quelle maggiormente influenzate dalla radiazione solare dal momento che possono raggiungere temperature epidermiche piuttosto elevate. Un ampio utilizzo di pavimentazioni fredde permetterebbe di ottenere benefici significativi, tuttavia la maggior parte dell'area cittadina è coperta da un'altra tipologia di superfici: le pavimentazioni convenzionali (strade, parcheggi e marciapiedi). Si stima infatti che la superficie occupata in varie città americane dalle pavimentazioni sia il 30-45% dell'area totale (Ferguson, 2008). Tali superfici durante il giorno assorbono ed accumulano energia solare che viene smaltita nella notte attraverso processi di raffreddamento radiativo e convettivo. Mentre il bilancio energetico dei tetti è condizionato principalmente da albedo ed emissività, le caratteristiche che influenzano il bilancio delle pavimentazioni sono più numerose; in aggiunta alle proprietà radiative infatti anche permeabilità, inerzia termica e convezione impattano sulle temperature epidermiche (On the Use of Cool Materials as a Heat Island Mitigation Strategy, 2007-2008). L'utilizzo di pavimentazioni fredde può garantire temperature superficiali inferiori e una minor quota di calore immagazzinato poiché in grado di riflettere una maggior percentuale della radiazione solare ed essere permeabili. L'albedo, come per i tetti freddi, sembra essere il maggior fattore di influenza delle temperature superficiali. La quota riflessa dei materiali tradizionali è del 5-40% ma attraverso l'aggiunta di additivi coloranti alle pavimentazioni, anche durante interventi di manutenzione sullo strato superficiale, essa può elevarsi fino al 75% (Ferguson, 2008). La diffusione commerciale di questi pigmenti non si è verificata anche per possibili problemi di abbagliamento durante la guida e per l'inadeguatezza di un'elevata riflessione in luoghi di stazionamento delle persone. Sebbene l'emissività sia una proprietà radiativa che influenza considerevolmente il bilancio energetico, non è una variabile modificata dalle pavimentazioni fredde poiché le pavimentazioni tradizionali posseggono una buona capacità di emettere radiazione. Si può invece intervenire sulla porosità delle pavimentazioni, utilizzando conglomerati aperti, in modo da andare a modificare l'impermeabilità delle superfici. Una pavimentazione permeabile infatti permette il passaggio dell'acqua attraverso il terreno sottostante, beneficiando del raffreddamento evaporativo. Tuttavia, superfici porose asciutte

possono limitare il trasferimento di calore verso il sottosuolo a causa della loro struttura, portando a temperature superficiali maggiori ma ad un minor accumulo termico, che è il maggior responsabile dell'UHI notturna. L'applicazione di pavimentazioni porose è ancora oggetto di ricerche e deve essere valutata nello specifico a seconda del campo di applicazione (Ferguson, 2008).

3.2.1 L'albedo nelle pavimentazioni

L'albedo, o riflettanza solare, è la percentuale di energia solare riflessa da una superficie. Una pavimentazione a bassa albedo assorbirà più energia e avrà di conseguenza una temperatura superficiale e del sottosuolo più calda. Le pavimentazioni convenzionali in calcestruzzo e in conglomerato bituminoso hanno un'albedo compresa tra 0.05 e 0.40, il che significa che stanno assorbendo dal 95% al 60% dell'energia solare che li raggiunge invece di rifletterla. A ciò si aggiunge ulteriormente il cambiamento dell'albedo nel tempo a causa dell'invecchiamento e dell'usura.

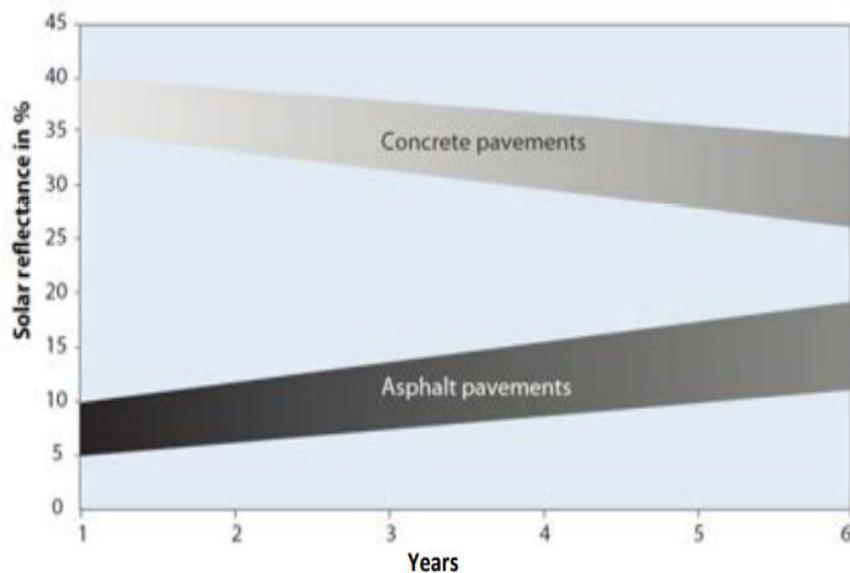


Fig. 23 Albedo tipico per calcestruzzo e conglomerato bituminoso negli anni (EPA, Ottobre 2008)

La figura 23 mostra come l'albedo delle pavimentazioni in calcestruzzo diminuisca nel tempo a causa dell'accumulo di sporco e traffico, mentre al contrario, per il conglomerato bituminoso aumenta con l'invecchiamento poiché il legante si ossida e si consuma andando così ad esporre l'aggregato (EPA, Ottobre 2008). La riflettività dell'uno e dell'altro si avvicina diventando fondamentale equivalente dopo circa sette anni di servizio senza la dovuta manutenzione (Tran, 2009).

3.2.2 Benefici

Le pavimentazioni fredde così come gli alberi da ombra possono giovare al consumo di energia e alla qualità dell'aria. I vantaggi sono sia diretti (riduzione delle temperature esterne) che indiretti (riduzione dell'utilizzo di aria condizionata, che diminuisce la richiesta ed il consumo di energia) (H.Potentials of Urban Heat Island Mitigation, 2005). Ad esempio, a Los Angeles, è stato stimato che un aumento di albedo di 0.25 per 480 miglia quadrate di pavimentazione porterebbe ad un risparmio di energia di raffreddamento per un valore di 15 milioni di dollari all'anno e ridurrebbe le spese mediche e di lavoro perse legate allo smog di 76 milioni di dollari all'anno (Levinson, 2001). Uno studio simile ha previsto nel 1998 che Los Angeles potrebbe risparmiare 90 milioni di dollari all'anno con il solo miglioramento dell'albedo dei suoi marciapiedi. Dal 1930 al 1990, il centro di Los Angeles ha registrato una crescita di 1°F per decennio. Se a questa informazione si aggiunge che per ogni grado °F vi è un aumento di circa 500 megawatt al carico di aria condizionata per il bacino di Los Angeles (H.Potentials of Urban Heat Island Mitigation, 2005), si intuisce come la questione ambientale sia di fondamentale importanza.

3.2.2.1 *Conservazione dell'energia*

Sono stati testati rivestimenti riflettenti sui tetti e sui marciapiedi degli edifici così come la piantumazione degli alberi per dimostrare riduzioni del consumo energetico tra il 10% e il 40%. È stato stimato che il risparmio energetico negli Stati Uniti da superfici fresche e alberi da ombra, quando completamente implementato, è di circa 5 miliardi di dollari all'anno (circa 100 milioni di dollari per casa con aria condizionata) (H.Potentials of Urban Heat Island Mitigation, 2005). Su scala minore, la riduzione di 5.4 °F delle temperature a Los Angeles porta a diminuire la richiesta di potenza di 1.6 gigawatt e ciò si traduce in un risparmio di circa 175 milioni di dollari l'anno (sulla base dei prezzi dell'elettricità nel 1996) (Gennaio, 2012).

3.2.2.2 *Durabilità*

Come affermato in precedenza, una conseguenza dell'UHI è la riduzione delle prestazioni della pavimentazione rispetto alla sua vita di servizio. Sono in corso test e ricerche per determinare se è

possibile utilizzare materiali per pavimentazioni fredde per migliorare la durata e la longevità di una pavimentazione (Gennaio, 2012).

3.2.2.3 Qualità dell'aria

La riduzione della temperatura in tutta la città può anche portare ad una migliore qualità dell'aria perché lo smog si forma più facilmente nelle giornate calde. Quest'ultimo è uno dei principali fattori che contribuisce alle malattie respiratorie e si prevede che sarà la terza causa di morte entro il 2030. Sono state effettuate simulazioni a Los Angeles nelle quali si stima che l'uso di superfici di colore chiaro e di alberi da ombra potrebbero raffreddare la temperatura dell'aria e quindi ridurre lo smog del 10%. (Gennaio, 2012)

3.2.2.4 Gestione delle acque di pioggia

Le superfici impermeabili incrementano il volume del deflusso dell'acqua piovana, aumentando la quantità diretta ai corpi superficiali vicini e alle fognature miste rispetto a superfici permeabili. L'uso di pavimentazioni permeabili, sia vegetate che non, permette all'acqua piovana di passare attraverso la superficie ed essere assorbita direttamente nel terreno portando ad un miglior drenaggio urbano.

3.2.2.5 Riduzione rumore

Le pavimentazioni permeabili creano una superficie aperta che può ridurre il rumore dello pneumatico da due a otto decibel, mantenendo i livelli al di sotto dei 75 decibel (EPA, Ottobre 2008).

3.2.2.6 Limitazioni

Uno studio ha scoperto che l'uso diffuso di pavimentazioni ad alto albedo può causare un aumento delle temperature delle pareti degli edifici, poiché assorbono parte della radiazione solare riflessa. Utilizzando un semplice modello di bilancio energetico urbano per simulazioni mesoscala (SUMM) per calcolare il bilancio energetico e la temperatura superficiale su ciascuna faccia della copertura urbana (tetto, pavimentazione e quattro pareti verticali), ciò che è stato determinato dal modello è

che il flusso di calore sensibile totale, la temperatura della chioma urbana e l'albedo della chioma complessiva dipendevano esclusivamente dall'albedo della pavimentazione e dalla geometria urbana (Kinouchi, 2004). La riflettanza della pavimentazione nel campo del visibile risulta anche argomento di interesse per l'ingegneria dei trasporti in quanto argomento di rilievo nell'uso della segnaletica orizzontale e dell'illuminazione artificiale delle strade (Levinson, 2001). Inoltre, è inevitabile lo scurirsi nel tempo della pavimentazione, soprattutto per quelle ad albedo alto, a causa dello sporco. Pertanto, alla progettazione va sempre affiancata una corretta manutenzione per pulire e rinnovare l'albedo. Infine, la limitazione più grande, all'uso delle pavimentazioni fredde, è legata alla scarsa applicabilità per le strade a traffico intenso o anche moderato poiché vi sono problemi di prestazioni connessi alla loro durata e sicurezza.

3.2.3 Tipi di pavimentazioni

3.2.3.1 *Pavimentazione convenzionale*

Il conglomerato bituminoso convenzionale è il tipo più comune di pavimentazione, ha il vantaggio di essere posato rapidamente e facilmente ed ha una vasta gamma di applicazioni, dai parcheggi a basso volume alle strade ad alto traffico fino alle piste aeroportuali. Offre ai conducenti una superficie di guida regolare con ottime caratteristiche di rugosità superficiale e visibilità della segnaletica orizzontale. Se correttamente progettate e mantenute, le pavimentazioni in conglomerato bituminoso possono durare per molti anni. Tuttavia, per quanto riguarda l'impatto ambientale, hanno una bassa riflettività a causa del loro colore scuro che le rende inclini ad assorbire e immagazzinare il calore dalla radiazione solare (le temperature massime estive possono raggiungere i 120 °C (Gennaio, 2012). L'albedo può comunque essere aumentata utilizzando leganti e aggregati di colore chiaro, che però diventano nel tempo esposti alle intemperie, oppure attraverso trattamenti e rivestimenti superficiali successivi alla posa in opera del conglomerato tradizionale, che ne migliorano la riflettività superficiale. Inoltre, una pavimentazione in conglomerato bituminoso convenzionale tende a schiarirsi con l'invecchiamento a causa dell'ossidazione e della levigazione e ciò comporta che la riflettanza solare iniziale tipica di circa 0.05-0.10 aumenti a valori compresi fra 0.12 e 0.18 in 6 anni (EPA, Ottobre 2008).

3.2.3.2 *Pavimentazioni a base di resina*

Utilizzano una resina per alberi trasparente al posto del tipico bitume nero. Ciò consente alla pavimentazione di mantenere l'aspetto naturale degli aggregati utilizzati nell'impasto in modo da risultare chiare e avere una migliore riflettività solare rispetto alle tradizionali pavimentazioni in conglomerato. Le pavimentazioni a base di resina sono generalmente utilizzate per le piste di escursionismo e ciclismo così come nei percorsi per lo sport e per le aree ricreative e sono spesso in combinazione con una varietà di leganti sintetici incolori e riflettenti da utilizzare con aggregati di colore chiaro (Tran, 2009).

3.2.3.3 *Pavimentazione porosa*

Una pavimentazione porosa è simile ad una convenzionale, ad eccezione della percentuale di aggregato fine nel mix significativamente ridotta o rimossa. Riducendo la parte fine, la percentuale di vuoti aumenta e la pavimentazione diventa permeabile. Ciò consente all'acqua piovana di defluire attraverso la pavimentazione. L'acqua immagazzinata nella pavimentazione può aiutare a raffreddare la pavimentazione mediante raffreddamento evaporativo, dove il calore immagazzinato nella pavimentazione viene consumato convertendo l'acqua in vapore acqueo. Anche la superficie porosa aumenta la conduttività termica essendo più esposta all'aria. È necessaria una manutenzione regolare per le superfici classificate aperte per evitare che polvere e altre particelle vadano ad ostruire la superficie (Levine, 2011). La manutenzione deve essere fatta almeno quattro volte all'anno attraverso l'uso di un getto ad alta pressione per sbloccare i pori nello strato superficiale. Per tutte le superfici classificate aperte, la riduzione del rumore rappresenta un ulteriore vantaggio (EPA, 1999).

3.2.3.4 *Pigmenti colorati e seals*

I pigmenti colorati e seals sono additivi che possono essere aggiunti alla miscela. Questi cambiano il colore del legante in modo da rendere la superficie più chiara, migliorandone la riflettività. L'ossido di ferro è l'applicazione più comune del pigmento, e dona una tonalità rossa, ma ci sono varietà di pigmenti che offrono molti colori. Pigmenti colorati e seals sono generalmente utilizzati per scopi decorativi su vialetti, marciapiedi e piste ciclabili.

La figura 24 mostra campioni colorati di pavimentazioni a strato sottile. Questi danno un'albedo maggiore rispetto alle pavimentazioni convenzionali per la loro riflettanza nel vicino infrarosso. Lo strato sottile bianco ha mostrato una differenza di temperatura superficiale di 27°F rispetto ai campioni testati.

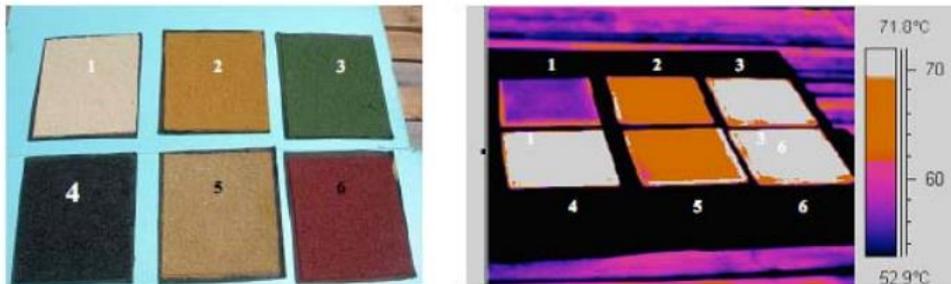


Fig. 24 Immagini di 5 campioni colorati a spessore sottile e di una pavimentazione nera convenzionale nel campo del visibile a sinistra e in quello dell'infrarosso a destra. (Synnefa, 2009)

3.2.3.5 Asphalt rubber

Viene prodotta utilizzando gomma riciclata per pneumatici, creando un legante che può essere utilizzato con aggregati convenzionali e riciclati. I principali vantaggi di una pavimentazione gommata sono l'essere conveniente, durevole, sicura, silenziosa e più rispettosa dell'ambiente (Gauff, Maggio 2012). Le pavimentazioni così realizzate presentano una conducibilità termica e quindi una minore capacità di accumulare calore. Poiché nella sottostruttura viene immagazzinato meno calore, esse si raffreddano più rapidamente di notte rispetto a una pavimentazione convenzionale dello stesso spessore, rimane invece simile la temperatura della superficie durante il giorno.

3.2.3.6 Convenzionale pavimentazione in cemento

Il calcestruzzo convenzionale è una pavimentazione molto comune, viene di solito utilizzata per marciapiedi, piazzali e parcheggi di aeroporti e come pavimentazione in aree commerciali, però meno dell'1% della superficie pavimentata totale delle città sono in calcestruzzo. In genere richiedono più tempo per essere posizionate, esse hanno una riflettività più alta rispetto ad una pavimentazione in conglomerato bituminoso convenzionale grazie al colore più chiaro del legante cementizio, ma nel tempo si scuriscono a causa dello sporco dovuto al traffico e la riflettanza può scendere da 0.40 per una costruzione ex novo a 0.27 dopo 6 anni (EPA, Ottobre 2008). L'albedo del

calcestruzzo può essere ulteriormente migliorata utilizzando materiali di colore più chiaro nella miscela iniziale, compresi aggregati di colore chiaro, cemento bianco, biossido di titanio e/o altri additivi.



Fig. 25 Aggregati di colore chiaro (Levinson, 2001)

3.2.3.7 Chip seals con aggregato di colore chiaro

Un "chip seal" è un comune intervento di manutenzione preventivo eseguito su strade a bassi volumi di traffico. Viene tipicamente applicato su strade in buone condizioni strutturali per prolungare la vita utile della pavimentazione e/o migliorare le caratteristiche della superficie. Viene costruito posizionando prima un sottile strato di emulsione di miscela sulla superficie della pavimentazione esistente e poi spargendo e annegando degli aggregati mediante rullo pneumatico. Ciò si traduce in una superficie che inizialmente assume l'aspetto dell'aggregato utilizzato. L'uso di aggregato di colore chiaro comporta una superficie con una riflettività molto maggiore di quella di una tipica pavimentazione in conglomerato bituminoso esistente, anche se questa diminuirà con il tempo man mano che gli aggregati continueranno ad essere annegati sotto l'azione del traffico. Tuttavia, ci sono ragioni che spingono a non usare queste pavimentazioni per le strade cittadine, poiché la superficie risulta molto rugosa con conseguenze anche sull'incremento del rumore di rotolamento. Esiste inoltre il rischio che gli aggregati sciolti vengono sollevati dai veicoli. Per questi motivi, l'ambito di utilizzo è più ideale per strade rurali a basso volume, residenziali a bassa velocità e vialetti privati. Inoltre, l'uso nei parcheggi richiede un'attenta considerazione poiché potrebbero non essere abbastanza durevoli per carichi a lungo termine (Tran, 2009).

3.2.4 Slurry seal convenzionale e gommato

È una miscela di bitume, acqua, aggregati fini ben graduati (rocce di dimensioni uniformi) e fillers minerali. Vengono utilizzati per attività di manutenzione preventiva, per il miglioramento delle caratteristiche di rugosità superficiale. Si prevede che possano durare dai 3 ai 5 anni. Sono solitamente neri ma possono essere resi grigi o marroni aggiungendo ossido di zinco (Gartland, Maggio 2001). Uno slurry seal gommato non solo è più durevole, ma possiede proprietà termiche in grado di dissipare l'accumulo di calore nella sottostruttura.

3.2.5 Verniciatura/Rivestimento superficiale colorato

Dipingere la superficie della pavimentazione con vernice di colore chiaro è un modo per migliorare la riflettività della superficie. Il materiale di rivestimento utilizzato è una combinazione di resine acriliche rinforzate con cemento, polimeri a base epossidica e una miscela di aggregati per fornire un colore e una consistenza durevoli alla superficie della pavimentazione (Tran, 2009). La pittura dai colori vivaci viene tipicamente utilizzata nei parcheggi per scopi decorativi, ma può anche essere applicata su superfici stradali e edilizie per aiutare a mitigare l'effetto isola di calore urbana. Tuttavia, una preoccupazione per la guida in sicurezza nasce quando si considera la visibilità della segnaletica orizzontale su una pavimentazione dai colori vivaci. Uno studio in Giappone ha concluso che alcuni tipi di pigmenti e strutture di pittura sono in grado di ottenere un'elevata riflettività per il vicino infrarosso e una bassa riflettività per lo spettro della luce visibile. In altre parole, la vernice potrebbe ottenere sia una bassa luminosità che un alto valore di albedo riflettendo esclusivamente lo spettro del vicino infrarosso della luce solare (Kinouchi, 2004)

3.3 Aree verdi e vegetazione

La mitigazione dell'isola di calore urbana può essere effettuata incrementando la presenza di parchi e piante. Molte aree urbane espandendosi hanno invece rinunciato ad alberi e spazi verdi, nonostante vi siano aree che possono essere utilizzate per ospitarli. La diffusione di alberi e vegetazione può contribuire alla diminuzione delle temperature urbane grazie all'ombreggiamento e all'evapotraspirazione. La radiazione solare che oltrepassa una pianta è infatti ridotta del 10-80%

d'estate e del 10-30% d'inverno, quando alcune piante non posseggono le foglie. Nelle vicinanze di un'area verde inoltre la quota di calore sensibile è inferiore, poiché parte della radiazione solare viene utilizzata per vaporizzare l'acqua invece di determinare un aumento di temperatura. L'ombreggiamento di un'abitazione prodotto da alberi di alto fusto, in grado di adombrare anche il tetto, diminuisce la temperatura delle superfici anche di 25 °C; la conseguenza è un risparmio energetico per il raffrescamento del 7-47% ed è maggiore quando le piante sono posizionate ad ovest rispetto alla casa (EPA, Ottobre 2008). Se un numero elevato di alberi fosse posizionato nei parcheggi e ai lati delle strade tutta la comunità cittadina godrebbe di una diminuzione di temperatura esterna come beneficio indiretto. Non bisogna trascurare inoltre il possibile contributo di parchi, all'interno dei quali i processi di evapotraspirazione sono maggiori del 300% (Rizwan, 2008), le temperature massime dell'aria sono inferiori di 2.5 °C e i gradi giorno di raffrescamento annuo sono inferiori del 40% rispetto alle aree urbane (On the Use of Cool Materials as a Heat Island Mitigation Strategy, 2007-2008). Alcuni studi dimostrano che l'effetto di raffrescamento può estendersi fino a 200-400 m dai parchi (Duhme, 2000) e che dovrebbero essere quindi largamente diffusi per apportare benefici su ampie zone. Tuttavia, i vantaggi ottenibili dall'aumento della presenza di alberi nelle zone urbane non si limitano alla riduzione della temperatura ambientale (Cole, 2008), infatti la presenza di alberi incrementa il valore estetico ed economico di una proprietà, contribuisce alla stabilizzazione del suolo, attenua il rumore urbano e fornisce un habitat a molte specie animali. Infine, anche la qualità dell'aria viene influenzata positivamente dalla vegetazione: molti inquinanti vengono assorbiti o aderiscono alle superfici vegetali, il processo di fotosintesi riduce l'anidride carbonica atmosferica e la diminuzione della domanda di energia elettrica per il raffrescamento riduce ulteriormente l'emissione di inquinanti e di gas serra.

3.4 Tetti verdi

La diffusione dei tetti verdi all'interno delle città è considerata una promettente tecnica di mitigazione dell'UHI; la riduzione dell'albedo e l'incremento dei processi di evapotraspirazione permettono infatti di limitare le temperature epidermiche delle superfici, quindi di ridurre il flusso di calore entrante e il riscaldamento dell'aria. La norma UNI 11235 del 2007 differenzia e classifica gli elementi che andranno a comporre il tetto verde in: elementi primari, elementi secondari e elementi accessori. Inoltre, i tetti verdi vengono classificati in: estensivo ed intensivo.

Elementi primari	Elementi secondari	Elementi accessori
-Elemento portante -Elemento di tenuta dell'acqua ed elemento di protezione dell'azione delle radici -Elemento di protezione meccanica -Elemento drenante ed elemento di accumulo idrico -Elemento filtrante -Strato colturale -Strato di vegetazione	-Strato termoisolante -Strato di zavorramento -Strato antierosione -Impianto di irrigazione -Strato di barriera al vapore -Strato di pendenza -Strato di regolarizzazione	-Elementi di ancoraggio della vegetazione -Elementi di trattenimento dello strato colturale -Elementi di trattamento dell'elemento drenante -Elementi di barriera al fuoco

Fig. 26 Elementi primari, secondari e accessori di un tetto verde secondo la norma UNI11235 del 2007

Per verde estensivo si intende quel tipo di copertura a verde che non richiede un numero elevato di manutenzioni. Il substrato arriva fino ai 15 cm di spessore.

Viceversa, il verde intensivo richiede manutenzioni costanti, le specie vegetali utilizzabili sono molte di più. In questo caso, invece, il substrato avrà uno spessore che parte dai 15 cm sino a oltre i 150 cm.

Infine, la norma UNI11235:2007 fa una grossa distinzione fra le varie tipologie di stratificazione utilizzabili: inverdimento a tre strati con drenaggio in materiale sfuso e inverdimento a tre strati con drenaggio in pannelli preformati. Nel primo caso avremo tre strati comprendenti:

- Strato drenante in materiale sfuso;
- Strato filtrante;
- Substrato colturale.

Nel secondo caso invece lo strato drenante è sostituito con pannelli preformati e non più da materiale sfuso, con ottimi risultati in termini di durevolezza nel tempo e funzionamento del sistema di drenaggio.



Fig. 27 Esempio di schema dei vari strati che compongono un tetto verde estensivo

Ogni strato installato assolve una specifica funzione:

- Un elemento portante rappresentato dalla soletta e dall'intero piano d'appoggio su cui verrà progettata la copertura verde;
- Un'impermeabilizzazione formata da un insieme di materiali affinché l'acqua non penetri al di sotto dello strato di accumulo per il deflusso;
- Una guaina antiradice posta al di sopra della guaina impermeabile, prodotta con sostanze sintetiche come PVC e polietilene (esclusivo per gli estensivi a Sedum – norma UNI11235 del 2007). Morbida nella consistenza, ben si adatta ai vari andamenti del piano orizzontale sottostante. Spesso le guaine impermeabili sono già complete di guaina antiradice (strato integrato). È comunque da ricordare che la guaina non deve presentare tossicità per le piante e che è comunque da utilizzare anche nel caso di tappeto erboso, piante erbacee e arbusti di piccole dimensioni;
- Strato di accumulo e protezione meccanica, posato direttamente sopra lo strato antiradice o impermeabile integrato. Attutisce i colpi dovuti a sollecitazioni meccaniche che avvengono sugli strati superiori, evitando così danni all'impermeabilizzazione, anche nella fase di predisposizione del tetto verde. Svolge inoltre una funzione di accumulo di acqua nei

momenti di stress idrico. In base al tipo di tetto verde che si intende realizzare ne variano i tipi di materiali che lo compongono;

- Strato drenante, filtrante e colturale, che permetta all'acqua di defluire facilmente. L'eccessivo accumulo di acqua è un problema serio per la vita delle piante e per l'intero sistema. Lo strato drenante comprende una serie di accorgimenti per far defluire l'acqua in eccesso quali: pendenza, scarichi, materiale drenante di diversa origine. Lo strato drenante può essere composto da: materiali di origine minerale e strati drenanti in plastica preformati in piastre o rotoli. Fra i materiali naturali che vengono utilizzati vi sono: argilla espansa, la migliore e la più utilizzata, pesa molto meno rispetto alla ghiaia (400kg/m^3 contro i 1500 della ghiaia) e trattiene l'umidità che può essere utile in periodi estivi quando le irrigazioni naturali sono meno frequenti; pomice; perlite; lapillo vulcanico; ghiaia. Per quanto riguarda invece i materiali prefabbricati in materiale plastico, sono strutturati in modo che si creino degli spazi pieni e vuoti dove l'acqua possa defluire senza problemi e senza incontrare ostacoli. Lo strato filtrante è composto da un filtro che impedisce alle particelle fini di terreno di insinuarsi negli spazi vuoti dello strato drenante, col rischio di intasare e rallentare lo scolo dell'acqua. È importante una scelta corretta del materiale filtrante, se non si vuole compromettere l'intero sistema. La membrana permeabile che compone lo strato filtrante non deve essere degradabile ma essere resistente e flessibile per sopportare il peso della terra e la forza delle radici. I materiali utilizzati come strato filtrante sono generalmente teli di materiale sintetico resistenti alle muffe e agli agenti chimici e andranno stesi direttamente sullo strato drenante. Lo strato fertile comprende lo strato dove le piante verranno messe a dimora e dove radicheranno. Un buon rapporto di aria, sostanze nutritive e acqua costituisce un ottimo strato fertile su cui le piante possono svilupparsi. Normalmente vanno preferiti terricci alleggeriti con argilla espansa, pomice, lapillo vulcanico ecc., che oltre a ridurre il peso complessivo dello strato fertile aiutano una maggior radicazione e un maggior deflusso idrico. Lo strato fertile ha uno spessore che varia a seconda delle piante messe a dimora.

4 IL MODELLO ENVI-met

4.1 Introduzione

La difficoltà nel simulare la risposta ambientale e microclimatica per un software di modellazione sta nel fatto che deve rispettare delle caratteristiche fondamentali (Huttner, 2009):

- Le previsioni di calcolo dei processi atmosferici devono essere accurate;
- La risoluzione della griglia riferita al modello dell'area considerata deve essere di un ordine non superiore le centinaia di metri per poter rappresentare bene l'ambiente (edifici e vegetazione), altrimenti si avrà un modello non confrontabile con la realtà;
- Il programma deve poter avere le informazioni energetiche di qualunque superficie.

ENVI-met è un software che utilizza un metodo di calcolo deterministico chiamato SVAT (Soil, Vegetation and Atmosphere Transfer), sviluppato dal Prof. Michael Bruse del Gruppo Modellistica Ambientale dell'Istituto di Geografia presso l'Università di Mainz, in Germania. Il modello opera su micro-scala ed è in grado di simulare l'evoluzione temporale di diversi parametri termo-fluidodinamici all'interno di una griglia tridimensionale. La griglia ci permette di ricreare la porzione di un'area urbana definita con edifici, strade e vegetazione. L'approccio adottato è olistico e considera l'ambiente come un unico organismo. Il software è dotato anche di una biblioteca in cui sono definiti i materiali e la vegetazione con le rispettive proprietà termiche, oltre ciò è anche possibile inserire manualmente ulteriori elementi mancanti in nomenclatura e dar a ciascuno di essi le rispettive proprietà. ENVI-met è composto da diverse sezioni, ognuna svolge un ruolo per la simulazione finale. I risultati delle simulazioni possono mostrare gli effetti che le soluzioni architettoniche, le tecnologie sostenibili, l'uso del verde e dell'acqua, danno per migliorare le condizioni microclimatiche outdoor. La struttura del software vede tre principali componenti di input (Area, File di configurazione e Database) che vanno a convergere nell'interfaccia (ENVI-met model) che svolge la vera e propria simulazione applicando i modelli di calcolo. I risultati dei calcoli svolti sono raggruppati in numerosi file output che possono essere letti e analizzati attraverso due ulteriori interfacce di lettura (Lettura grafica e Creazione File di Testo).

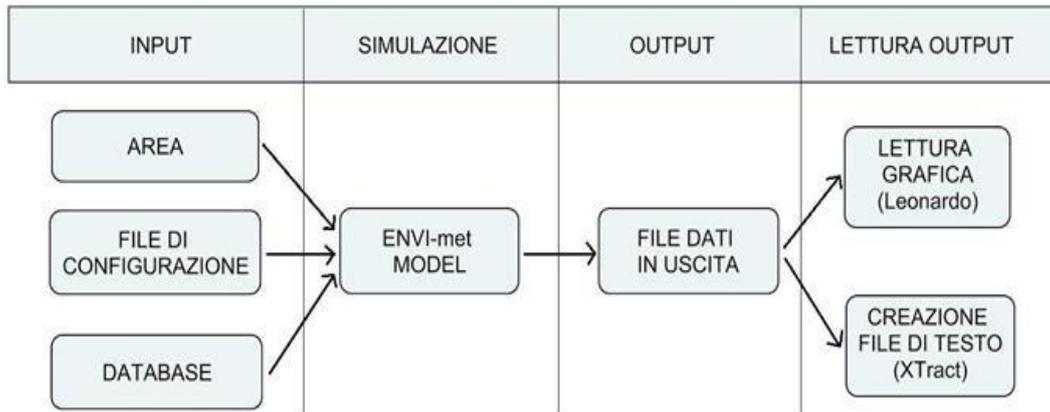


Fig. 28 Struttura del software ENVI-met

Si è scelto di operare con ENVI-met anche se nella sua versione lite poiché dotato di una forte base di calcolo (equazioni di Navier-Stokes, modello fluidodinamico e turbolenze, radiazione e scambi dovuti all'evapotraspirazione delle piante, modellazione sky-factor, etc.) e di un'interfaccia semplice, immediata e di facile utilizzo.

4.1.1 Input

Gli input della simulazione possono essere suddivisi in tre componenti: "Spaces", "ENVI-guide" e "Database Manager". Questi tre elementi vengono importati nell'interfaccia che svolge la vera e propria simulazione (ENVI-core), al suo interno si applicano i modelli di calcolo. L'area di analisi può essere realizzata dalla sezione Spaces e viene rappresentata con un modello discretizzato in celle (volumi finiti - grids): è possibile decidere non solo il numero di celle componenti il modello, ma anche la dimensione, ovvero la risoluzione, con cui si può rappresentare tale area. Questi volumi possono avere delle dimensioni dx, dy, dz a scelta dell'utente (si consiglia l'uso di una griglia quadrata per le aree dx dy), mentre il numero massimo di grids a disposizione dell'utente nella versione lite per poter avviare la simulazione è 50x50x40.

4.1.1.1 SPACES

La sezione Spaces contiene i dati geometrici e qualitativi del modello simulato, come:

- Dimensione dell'area (sottoforma di numero di grids);
- Edifici (altezza, sporgenze e rientranze);

- DEM (quota del terreno);
- Tipo di vegetazione;
- Tipologie di suolo e strade;
- Presenza di specchi d'acqua.

È attraverso questa interfaccia che si identifica la zona geografica in cui l'area del modello è posta e l'orientamento cardinale della stessa. La determinazione dell'area geografica avviene attraverso la scelta di una città cui associare l'area, oppure mediante l'indicazione delle coordinate di latitudine e longitudine del sito. È possibile porre all'interno del modello anche dei punti di ricezione speciale, detti recettori, cui viene associato un file output che raccoglie i dati relativi allo spazio sovrastante il punto stesso.

4.1.1.2 ENVI-guide

La sezione ENVI-guide presenta al suo interno tutti i parametri iniziali di calcolo, le condizioni al contorno della simulazione e altri dati aggiuntivi relativi all'area modellata. Il file contiene le seguenti informazioni:

- Data solare di inizio simulazione;
- Durata della simulazione (in ore);
- Ora di inizio della simulazione (nel giorno indicato);
- Dati relativi al vento (direzione di provenienza, velocità a 10 m dal suolo, indice di rugosità della zona);
- Presenza di nuvole in cielo;
- Eventuali sorgenti di gas inerti o particolato (l'anidride carbonica è trattata insieme alla vegetazione);
- Opzioni relative al tipo di condizioni al contorno per il calcolo;
- Modelli e condizioni di calcolo per le turbolenze dell'aria;
- Informazioni strettamente legate all'organizzazione dei file relativi alla simulazione (collegamento col file Area, nomi della simulazione e dei file output).

4.1.1.3 Database Manager

I “database manager” associati ad ogni modello di simulazione sono una vera e propria libreria contenente al suo interno:

- I profili stratigrafici;
- I tipi di terreno;
- I materiali;
- Le piante;
- Le superfici degli edifici;
- I tetti verdi.

Ognuno di questi file contiene dati e parametri che vengono poi impiegati nelle equazioni dei modelli fisico-matematici implementati dal software. Si tratta di dati legati alla tipologia specifica di piante o terreno: contenuto d’acqua, conducibilità termica, caratteristiche fisiologiche delle foglie e delle radici, densità di area fogliare, riflettanza.

4.1.2 Interfaccia di simulazione

ENVI-core è l’interfaccia di simulazione e rappresenta la parte centrale del software, che associa i file di input relativi al modello ed esegue i calcoli.

Rappresenta il motore del software, si serve di complessi modelli di calcolo attraverso cui generare tutti i parametri fluido dinamici come il flusso d’aria e la turbolenza e simulare i processi termodinamici che interessano le superfici, gli edifici e la vegetazione, compresi tutti i tipi di radiazione e le evoluzioni delle variabili climatiche nel tempo.

Per svolgere la simulazione il software implementa dei modelli fisici teorici tradotti in sistemi di equazioni molto complessi, solitamente non lineari e li risolve attraverso modelli matematici. Tali sistemi sono ingigantiti e maggiormente complessi a causa della tridimensionalità del modello cui vengono applicati. Il rischio di divergenza nello svolgimento dei calcoli è molto alto, per questo il programma ha bisogno di parametri di calcolo e di espedienti di controllo che impediscano di arrivare a punti critici nello svolgimento delle equazioni. Durante questa attività, attraverso una finestra sullo svolgimento della simulazione, è possibile controllare l’avanzamento dei calcoli,

mediante l'indicazione istantanea del tempo simulato e gli eventuali errori che portano al blocco del processo.

4.1.3 Output

ENVI-met genera moltissimi output e li suddivide in cartelle di destinazione a seconda dei datafield cui sono associati i dati. I datafield in cui sono organizzati i risultati sono così denominati: Atmosphere, Biomet, Buildings, Inflow, Log, Radiation, Receptors, Soil, Surface e Vegetation.

Si approfondisce sui più importanti:

- La cartella Atmosphere contiene due file per ogni ora di simulazione: l'uno, leggibile come normale file di testo, non contiene tuttavia dati comparabili a meno che non sia aperto tramite una delle due interfacce di lettura degli output; l'altro risulta collegato ed associato al primo, anche se non viene mai aperto ed analizzato direttamente. Questi file orari contengono, per ogni quota z corrispondente ad una cella, i dati relativi a: vento (velocità sulle tre direzioni, velocità complessiva, direzione risultante, variazione percentuale di velocità del vento), umidità relativa e assoluta, temperatura dell'aria, espressa attraverso temperatura potenziale (di cui è indicata anche la variazione oraria) e la temperatura media radiante. Sono indicate anche le temperature superficiali, espresse però attraverso la temperatura del bordo della cella. I file ATM contengono anche numerosi dati relativi al flusso di vapore, di anidride carbonica o di altri inquinanti eventualmente inseriti nel modello e informazioni relative alla vegetazione; vi sono poi ulteriori informazioni riguardanti le turbolenze: coefficienti di scambio e dissipazione cinetica. Sono presenti anche risultati relativi ai flussi radiativi: flusso incidente (diretto, diffuso e riflesso), fattore di vista del cielo (differenziato a seconda che consideri solo gli edifici o l'interazione di edifici e vegetazione), flussi radiativi di scambio a bassa frequenza;
- La cartella Biomet raccoglie i dati per effettuare l'analisi del benessere di soggetti virtuali inseriti nell'area analizzata, i dati relativi alla prima lettura del modello di area e del file di configurazione da parte dell'interfaccia di simulazione e i dati contenenti le informazioni della simulazione riguardante ulteriori ambiti;
- La cartella denominata Inflow contiene dati relativi al modello monodimensionale che ENVI-met calcola inizialmente per avere dei dati di partenza impiegati come forzanti per la

risoluzione delle equazioni successive. Esiste dunque un file per ogni ora di simulazione che esprime i valori di alcuni parametri, da $z=0$ metri a $z=2500$ metri, ad intervalli di spazio sempre maggiori con l'aumentare della quota. I parametri sono pressoché tutti relativi al vento e alle turbolenze dei flussi d'aria relativamente ai quali il software necessita di avere maggiori dati iniziali. Esiste anche un valore di temperatura e di umidità specifica dell'aria. Alla quota coincidente col punto più alto del modello tridimensionale, nell'ora di inizio della simulazione, tale valore di temperatura coincide con il valore iniziale imposto del file di configurazione e varia di ora in ora secondo la radiazione solare in funzione del modello astronomico-solare applicato. Tali dati non sono strettamente necessari per l'analisi dei risultati, essi sono utili piuttosto per avere un'idea dei parametri necessari al programma per il calcolo dei flussi d'aria e, al più, per controllare il gradiente di temperatura e vento oltre la quota del modello tridimensionale. I dati sono comunque indicativi: il modello monodimensionale, in quanto tale, non distingue e diversifica i punti dello spazio, ritenendo che sopra la quota estrema del modello tridimensionale i parametri siano pressoché identici e non subiscano più l'influenza degli elementi presenti nell'area;

- La cartella indicata come "Receptors" contiene tutti i dati relativi ai recettori che sono stati posti nel modello. È dunque presente una sottocartella per ognuno di essi. Per meglio comprendere i dati di output in oggetto è necessario ricordare che un recettore posto in un punto del modello restituisce i dati relativi a tutta la colonna di volumi discreti posta sopra il recettore stesso; e anche quelli relativi alla porzione di suolo sottostante. All'interno di ogni sottocartella, dunque, sono presenti tre tipologie di file: dati atmosferici, dati relativi ai flussi radiativi scambiati e dati relativi al suolo. I file relativi ai recettori sono molto utili per l'analisi del modello; essi infatti permettono di avere immediatamente informazioni relative ad un singolo punto e su tutta l'altezza dello stesso. Ottenere queste informazioni sarebbe possibile anche attraverso gli altri file output, ma solo mediante un laborioso "taglio" dei dati all'interno dei file "tridimensionali";
- La cartella "Soil" presenta due file per ogni ora di simulazione. Anche in questo caso, le informazioni raccolte in essa possono essere lette attraverso l'interfaccia grafica Leonardo o con XTract. Dai dati in questa cartella è possibile ottenere informazioni relative alla temperatura del suolo ed al suo contenuto d'acqua a diverse profondità dalla superficie fino a $z=-50$ cm;

- La cartella "Surface" contiene due file per ogni ora di simulazione, in modo identico alle cartelle Soil e Atmosphere. I file surface contengono dati relativi solamente alla quota $z=0$, si tratta dunque di dati bidimensionali. Essi presentano informazioni relative alla temperatura della superficie e alla sua variazione nel tempo, all'umidità relativa dell'aria e alla velocità del vento alla prima quota sovrastante la superficie del suolo. Sono poi presenti altri dati relativi ai flussi radiativi scambiati dalla superficie del suolo con il primo strato d'aria e alle radiazioni che incidono sul suolo. Dati simili sono presenti anche nei file dei recettori, dove tuttavia è più difficile identificare il significato fisico di ogni flusso poiché risultante da un bilancio complesso. In questo file invece i dati sono relativi ai soli flussi incidenti la superficie, differenziati per provenienza: sole / cielo, vegetazione, edifici circostanti.

4.1.4 Lettura degli output

Il software ENVI-met prevede due interfacce di lettura dei dati in uscita: Leonardo e Xtract:

- Leonardo rappresenta l'interfaccia di lettura grafica dei file output. Importando uno di questi file all'interno dell'interfaccia Leonardo è possibile visualizzare l'elenco dei parametri output presenti in esso e selezionare il metodo di rappresentazione più adeguato per ognuno. Leonardo permette di visualizzare i dati attraverso quattro principali metodi grafici: data, vector, special, isoline. Essi rappresentano dei layer sul disegno, vale a dire una sorta di "strato" sul disegno ed è possibile visualizzarli singolarmente o contemporaneamente a seconda del tipo di rappresentazione che si desidera ottenere e anche svolgere operazioni fra di essi. Il primo visualizza i dati su una scala cromatica, con legenda affiancata alla mappa. È utile per la rappresentazione del gradiente di temperatura, o può essere associato alla rappresentazione dei vettori o delle isolinee per esprimere, attraverso il colore, un dato in più associato all'indicatore. Il secondo visualizza i dati attraverso delle frecce (vettori) direzionati e con modulo proporzionale al valore. È un ottimo metodo di rappresentazione del flusso d'aria e del vento. Il layer Special è usato per l'indicazione degli edifici e della vegetazione all'interno della rappresentazione grafica degli altri parametri. Infine, Isoline utilizza il metodo di rappresentazione delle isolinee. Permette di visualizzare la distribuzione di molti parametri come fattore di vista del cielo, temperature, flussi radiativi incidenti, fattori legati alla turbolenza dell'aria, velocità del vento. Accanto alle curve viene indicato il valore del parametro che essa rappresenta. Una volta indicati i parametri da rappresentare e scelto il metodo con cui farlo, Leonardo permette di definire il piano spaziale del quale si vogliono analizzare i dati. Si può scegliere di sezionare lo spazio su piani orizzontali xy a diverse quote z, oppure su piani xz e yz a definiti livelli rispettivamente della coordinata y e x. Attraverso questo sistema è possibile visualizzare i dati in tutti i punti dello spazio modellato. Il limite di questa rappresentazione è che essa è limitata solamente ai dati del file orario definito, non si può rappresentare la variazione di un solo o più parametri lungo tutto l'arco della giornata. L'unico confronto possibile è per differenza, fra due momenti del giorno diversi.

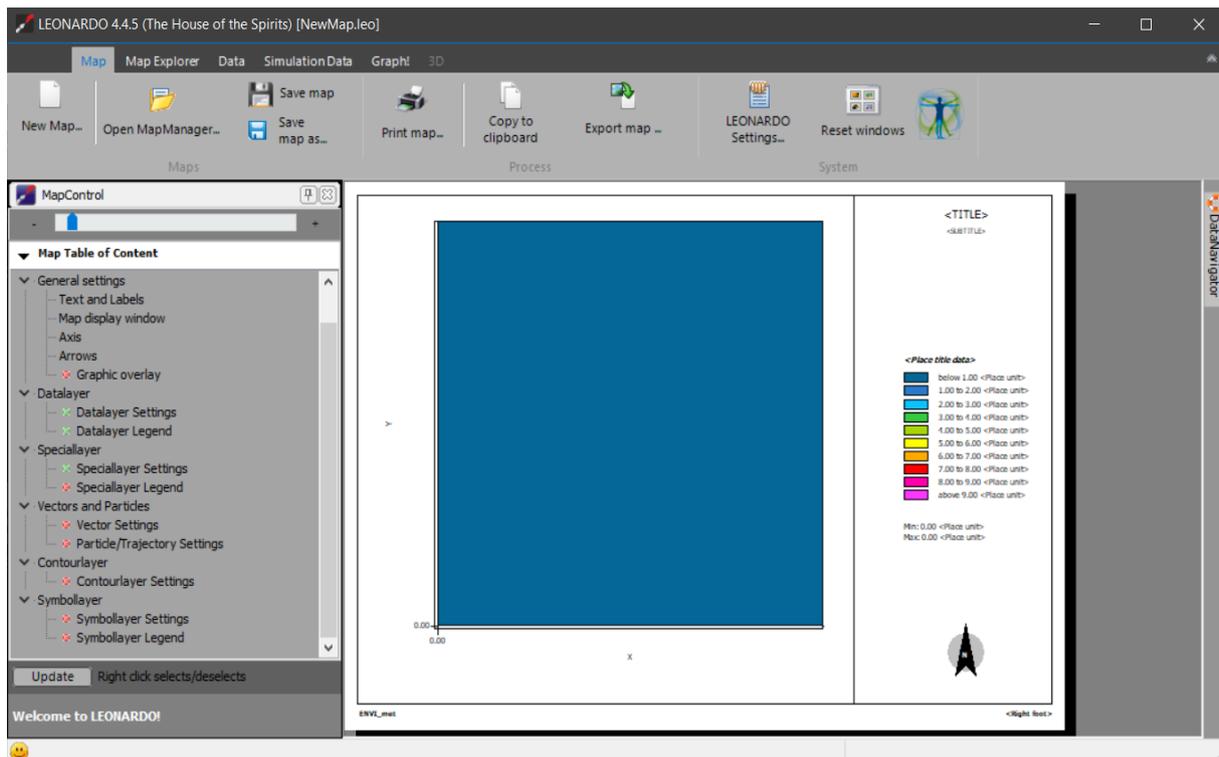


Fig. 29 ENVI-met LEONARDO

- XTract serve per estrarre dai file bidimensionali e tridimensionali in uscita dalla simulazione dei file di testo leggibili ed analizzabili contenenti i dati di output. L'interfaccia è estremamente intuitiva. Scelto il file output da analizzare, lo si importa all'interno del software, attraverso le coordinate si sceglie il piano di sezione e si effettua il "taglio". Così si ottiene un ulteriore file contenente i dati che si desiderano in un formato leggibile e importabile in altri programmi di analisi dati. Per quanto facile, una sezione effettuata in questo modo presenta alcuni limiti. In primis il fatto che la sezione di dati viene effettuata solamente su di un datafield. Si è dunque costretti a scegliere un solo parametro fra tutti gli output che il programma propone. Il "taglio" è inoltre effettuato su di un file orario, dunque i dati ottenuti saranno relativi solo a quell'istante della giornata. Si comprende così come, per poter effettuare un'analisi numerica, ad esempio quella della variazione giornaliera di un parametro (che, come si è visto, non è possibile effettuare con Leonardo), sia necessario estrarre numerosi file ed importarli poi tutti insieme in un foglio di calcolo.

4.2 Modelli di calcolo

Di seguito sono esplicitati, le ipotesi di calcolo e le condizioni iniziali, oltre che i modelli che il programma applica.

4.2.1 Ipotesi di calcolo e condizioni iniziali

Per modellare l'area di lavoro e svolgere i calcoli associati ad equazioni di bilancio, lo spazio del modello di simulazione viene discretizzato in volumi finiti. Per questo il file "Spaces" è costituito da celle tridimensionali scelte ed impostate in fase iniziale. Le equazioni di bilancio associate da questo sistema ai volumi finiti non sempre sono lineari. Il gran numero di equazioni da risolvere e l'iteratività delle stesse, porta a lunghi tempi di simulazione del modello. Per risolvere questo enorme ammontare di equazioni il sistema necessita di semplificazioni e condizioni al contorno forti, senza tuttavia rischiare di perdere informazioni importanti o precisione nei dati. Nel file "Spaces" i volumi discreti sono impostati liberamente con lunghezza variabile nelle tre dimensioni dello spazio, in moduli aventi per dimensione minima 0,5 m. L'altezza risultante dalle celle del modello, tuttavia, non è sufficiente ed alcuni dati di calcolo sono necessari fino ad un'altezza pari a 2500 metri. Poiché non risulta sensato modellare tridimensionalmente fino a tale quota, a causa della mole di calcoli che ogni singolo volume comporta, al modello di area tridimensionale si associa un sistema monodimensionale. Esso ha inizio oltre il modello tridimensionale, a quote alle quali non si risente più dell'influenza degli elementi presenti nell'area e fornisce dati fino a quote pari a 2500 metri. Come in tutti i programmi che impiegano metodi numerici, i bordi dell'area rappresentano un problema poiché le equazioni non possono essere risolte in quei punti ed è quindi necessario imporre delle ipotesi per permettere lo svolgimento dei calcoli.

Envi-met permette di scegliere tre ipotesi per le condizioni a contorno:

- 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.

La scelta delle ipotesi relative alle condizioni a contorno è importante per l'incidenza dei bordi sui dati calcolati all'interno dell'area. Per limitare questo effetto è dunque necessario scegliere l'ipotesi più adatta in funzione dei dati da analizzare.

4.2.2 Modello del vento

Il programma implementa le equazioni di Navier-Stokes e l'equazione di Boussinesq. Le equazioni di Navier-Stokes rappresentano un sistema di equazioni differenziali alle derivate parziali descriventi il comportamento di un fluido dal punto di vista macroscopico, per questo una delle condizioni necessarie per la risoluzione è la continuità del fluido fra le diverse interfacce di calcolo e fra i volumi in cui il modello è discretizzato. Il sistema è il seguente:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + u_i \frac{\partial u}{\partial x_i} &= -\frac{\partial p}{\partial x} + K_m \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x_i^2} \right) + f(v - v_g) - S_u \\ \frac{\partial v}{\partial t} + u_i \frac{\partial v}{\partial x_i} &= -\frac{\partial p}{\partial y} + K_m \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x_i^2} \right) - f(u - u_g) - S_v \\ \frac{\partial w}{\partial t} + u_i \frac{\partial w}{\partial x_i} &= -\frac{\partial p}{\partial z} + K_m \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x_i^2} \right) + g \frac{\theta(z)}{\theta_{ref}(z)} - S_w \\ \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} &= 0 \end{aligned}$$

dove f è il parametro di Coriolis, pari a $10^4(s^{-1})$, p rappresenta la pressione locale della perturbazione, θ la temperatura potenziale alla quota z . Si aggiunge al sistema un'ulteriore equazione, quella di continuità rappresentata dall'ultima espressione scritta. Il sistema di equazioni deriva da tre principi fisici di base: conservazione della massa (equazione di continuità), secondo principio della dinamica (bilancio della quantità di moto) e primo principio della termodinamica (conservazione dell'energia). Si considerano inoltre le pressioni che vengono approssimate tramite l'equazione di Boussinesq. Attraverso il calcolo della distribuzione del flusso d'aria il programma calcola anche una prima distribuzione delle temperature e dei flussi di umidità. La superficie del suolo e la presenza di vegetazione vengono considerate nell'equazione mediante i termini S_u , S_v e S_w , mentre le superfici degli edifici sono incluse come termini influenti solo sulla temperatura.

4.2.3 Modello delle turbolenze

Si genera una turbolenza quando il flusso d'aria è tagliato ed ostacolato dalla presenza di un corpo fermo quale la parete di un edificio o un elemento della vegetazione. A seconda del profilo di vento si possono avere turbolenze che aumentano e vengono trasportate anche lontano dalla sorgente principale di tale variazione di flusso d'aria.

Per simulare questo effetto viene applicato il cosiddetto "1.5 order turbulence closure model", che si basa su due variabili: la turbolenza locale (E) ed il suo tasso di dissipazione (ϵ). L'energia cinetica in questo caso rappresenta una misura dell'intensità delle turbolenze dell'aria; essa risulta direttamente legata al trasporto locale di calore e umidità. Il sistema implementato è di due equazioni di cui la prima descrive la distribuzione di energia cinetica nell'aria in funzione della produzione dei moti convettivi e la seconda esprime la dissipazione dell'energia stessa. I termini Pr e Th rappresentano la produzione e la dissipazione di energia relativa alle turbolenze d'aria dovute al flusso di vento e alla stratificazione termica. QE e Q ϵ sono dei termini che servono per considerare le turbolenze addizionali o gli ostacoli alle stesse prodotte dalla vegetazione.

$$\frac{\partial E}{\partial t} + u_i \frac{\partial E}{\partial x_i} = K_E \left(\frac{\partial^2 E}{\partial x_i^2} \right) + Pr - Th + Q_E - \epsilon$$

$$\frac{\partial \epsilon}{\partial t} + u_i \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} = K_\epsilon \left(\frac{\partial^2 \epsilon}{\partial x_i^2} \right) + c_1 \frac{\epsilon}{E} Pr - c_3 \frac{\epsilon}{E} Th - c_2 \frac{\epsilon^2}{E} + Q_\epsilon$$

4.2.4 Modello della temperatura e dell'umidità

Temperature e umidità sono strettamente legate fra loro e vengono calcolate attraverso il seguente sistema che include anche apporti e assorbimenti interni di calore e vapore d'acqua.

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} + u_i \frac{\partial \theta}{\partial x_i} = Kh \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial x_i^2} \right) + \frac{1}{C_p \cdot \rho} \cdot \frac{\partial R_{n,lw}}{\partial z} + Q_h$$

$$\frac{\partial q}{\partial t} + u_i \frac{\partial q}{\partial x_i} = Kq \left(\frac{\partial^2 q}{\partial x_i^2} \right) + Q_q$$

h rappresentano il calore e il vapore scambiati dalla vegetazione con l'atmosfera e vengono calcolati attraverso i modelli matematici descriventi la vegetazione.

4.2.5 Modello dei flussi radiativi

I flussi radiativi entranti nel modello sono necessari come condizioni a contorno. Essi sono calcolati attraverso un modello che approssima i flussi di radiazione a bassa frequenza. L'effetto dei flussi radiativi, nello spettro a bassa frequenza, è considerato sia nei confronti del suolo, sia della vegetazione, dell'aria, delle superfici degli edifici. Il calcolo di tale flusso all'interno dell'ambiente urbano è molto complesso perché vede flussi in direzione orizzontale e verticale. Per la risoluzione delle equazioni dei flussi energetici radiativi si rendono necessarie delle semplificazioni; una di queste è l'assunzione di un comportamento isotropo dell'aria, in modo tale che, per la risoluzione, siano necessarie solo tre temperature: quella dell'aria della cella considerata, quella della superficie del terreno e quella dell'atmosfera al di sopra della cella. In questo modo il problema del flusso radiativo viene ridotto ad un calcolo di emissività. All'interno del modello rappresentato i flussi di radiazione solare sono modificati, alterati, schermati, assorbiti e riemessi dagli elementi presenti quali vegetazione ed edifici, oltre che dal suolo stesso. Per stimare l'effetto di tali flussi, si introduce il concetto di coefficiente di riduzione del flusso; tali coefficienti variano da 1 (flusso indisturbato) a 0 (flusso completamente assorbito). In totale sono impiegati 5 diversi coefficienti di riduzione. Tra questi spicca il fattore di vista del cielo (sky view factor); come gli altri coefficienti varia fra 1 (cielo libero) e 0 (cielo completamente oscurato).

4.2.6 Modello del suolo

Dati gli input relativi al suolo e ai suoi componenti il software è in grado di calcolare la distribuzione di temperature ed acqua nel terreno. Per fare questo sono implementate le formule di Clapp e Hornberger capaci di descrivere la conducibilità termica del terreno in funzione del suo contenuto d'acqua. L'equazione idraulica include anche un termine sottrattivo che computa l'acqua assorbita dalle radici delle piante. I bacini d'acqua sono rappresentati con speciali tipi di suolo. Il modello non include invece eventuali moti turbolenti dell'acqua; non è inoltre possibile simulare la presenza di elementi particolari come ad esempio le fontane. Il modello del suolo è organizzato in 14 strati che giacciono fra la superficie del suolo, fino a 2 metri di profondità. La risoluzione verticale varia da

0.01 m per gli strati più vicini alla superficie, fino a 0.5 m per quelli più profondi. I processi di scambio fra strati vengono simulati in termini di calore e trasferimento d'acqua. La distribuzione di calore (T) e di umidità (contenuto d'acqua in volume) (μ) sono dati dalle equazioni monodimensionali:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = K_s \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}$$

$$\frac{\partial \mu}{\partial t} = D_\mu \frac{\partial^2 \mu}{\partial z^2} + \frac{\partial K_\mu}{\partial z} - S_\mu$$

Con: s =diffusività termica, K_μ =conduttività idraulica, D_μ =diffusività idraulica

Il fattore aggiuntivo S_μ rappresenta la porzione d'acqua assorbita dalle radici delle piante presenti nello strato di suolo in analisi e viene calcolato nel modello della vegetazione.

4.2.6.1 Modello della vegetazione

La vegetazione è trattata come una colonna monodimensionale di altezza z_p in cui il profilo della densità d'area delle foglie (LAD) è usato per descrivere la densità e la distribuzione delle foglie. Lo stesso concetto è usato, all'interno del suolo, fino ad una profondità $-z_r$, per descrivere la distribuzione delle radici, attraverso il RAD (Root Area Density). Questo schema universale può essere applicato sia alle piante ad alto fusto, sia ai cespugli, sia all'erba, semplicemente associando ad ogni tipo di pianta i propri valori di z_p e z_r . I flussi turbolenti di calore e vapore sono ottenuti in funzione del campo di vento calcolato in precedenza e in funzione della geometria della pianta. Gli scambi di gas e di calore fra la vegetazione e l'atmosfera sono controllati mediante un bilancio locale funzione della temperatura e della porosità delle piante. La traspirazione delle foglie, direttamente legata alla porosità della foglia stessa è una funzione complessa dipendente da parametri climatici esterni quali temperatura dell'aria e radiazione solare disponibile, e da altri parametri più strettamente legati alla fisiologia della pianta quali il processo di fotosintesi e la domanda di anidride carbonica. Per il calcolo di questi fattori e anche per la determinazione della forma e dell'altezza delle piante, Envi-met impiega delle funzioni standard e normalizzate: LAD e RAD, rispettivamente Leaf Density Area e Roots Density Area.

5 LE SIMULAZIONI

5.1 Descrizione dei siti

Le aree oggetto della riabilitazione sono rispettivamente delle porzioni del Porto e dell'Aeroporto del Comune di Ancona:

- Il porto di Ancona (sigla internazionale IT AOI) è situato nella parte più interna del Golfo di Ancona ed è perciò nel suo nucleo più antico un porto naturale; tra i primi porti dell'Adriatico per le merci, per ciò che riguarda la pesca, i mercati ittici di Ancona sono nel loro insieme al secondo posto nell'Adriatico e al sesto posto in ambito nazionale, mentre per tonnellate di stazza lorda, il porto peschereccio è al terzo posto in Italia e al primo in Adriatico con 4.566 TSL. Nel corso dei secoli è stato poi più volte ampliato con opere di protezione ed è attualmente sede dell'Autorità di sistema portuale del medio Adriatico, che comprende anche i seguenti porti di rilevanza regionale: Pesaro, Fano, Civitanova Marche, San Benedetto del Tronto, Porto San Giorgio, oltre ai porti di Pescara e Ortona in Abruzzo. Ancona è il primo porto italiano per traffico internazionale di veicoli e passeggeri. Importante centro della cantieristica italiana, con il cantiere navale della Fincantieri e quattro cantieri specializzati, i lavoratori sono tra i cinquemila e i seimila.

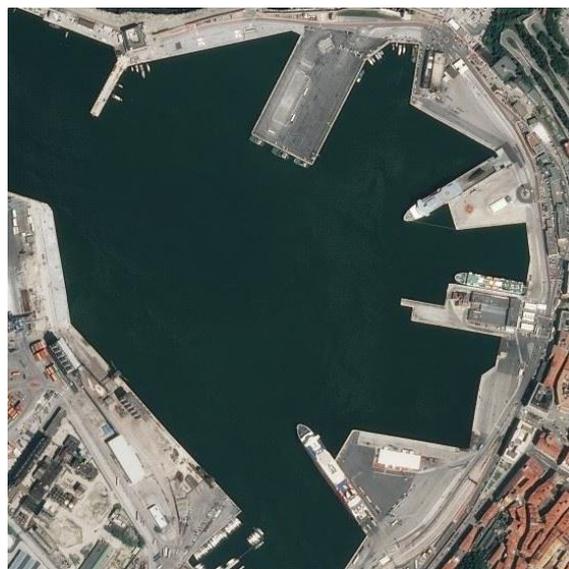


Fig. 30 Porto di Ancona

- L'Aeroporto delle Marche (IATA: AOI, ICAO: LIPY), anche chiamato Aeroporto di Ancona-Falconara è un aeroporto italiano intitolato a Raffaello Sanzio situato a 18 km dal centro della città di Ancona, più precisamente a Castelferretti, nel comune di Falconara Marittima. Vi operano sia vettori di linea che compagnie charter internazionali. Nel 2016 lo scalo di Ancona ha registrato 480442 passeggeri, in diminuzione del 7.8% rispetto al 2015. Per quanto riguarda il settore merci, volano regolarmente DHL Aviation e Star Air. Nel 2014 il totale delle merci ha raggiunto il valore di 6990 tonnellate, in aumento del 5.02% rispetto al 2013. Quest'ultimo dato pone l'aeroporto delle Marche al dodicesimo posto tra gli aeroporti italiani, dopo Torino e prima di Catania, e al secondo posto tra gli aeroporti adriatici, dopo Venezia e prima di Bari. La struttura è dotata di una pista di volo di 2.991 x 45 m e di un *apron* di superficie 52780 m² con 14 stand aeromobili remoti. L'aerostazione è composta da due terminal passeggeri (arrivi e partenze), ciascuno di 6300 m², e da un terminal merci con un'area di stoccaggio di 1800m². L'aeroporto è gestito dalla società di *handling* Aerdorica SpA, con capitale sociale per circa l'80% della Regione Marche, per il 15% circa di imprenditori locali e per il restante 5% della Provincia di Ancona e del Comune di Ancona. Il 7 agosto 2015 la Regione Marche e gli altri soci approvarono l'ingresso, come socio di maggioranza al 53%, della *Novaport Italia*, che si riprometteva di aumentare la quota societaria successivamente, ma il 28 ottobre 2015 l'Enac congela la privatizzazione dell'aeroporto e quindi l'operazione viene bloccata. All'interno della zona aeroportuale opera l'Aero Club Ancona con servizio di rifornimento carburante e scuola di volo FTO. Sull'aeroporto operava fino al 2012 anche il 5° Nucleo Elicotteri dell'Arma dei Carabinieri, che con i suoi A109 copriva i territori di Marche e Abruzzo. All'interno dell'aeroporto è presente un impianto fotovoltaico di 870 m² che genera circa il 25% dell'energia elettrica necessaria al funzionamento della torre di controllo

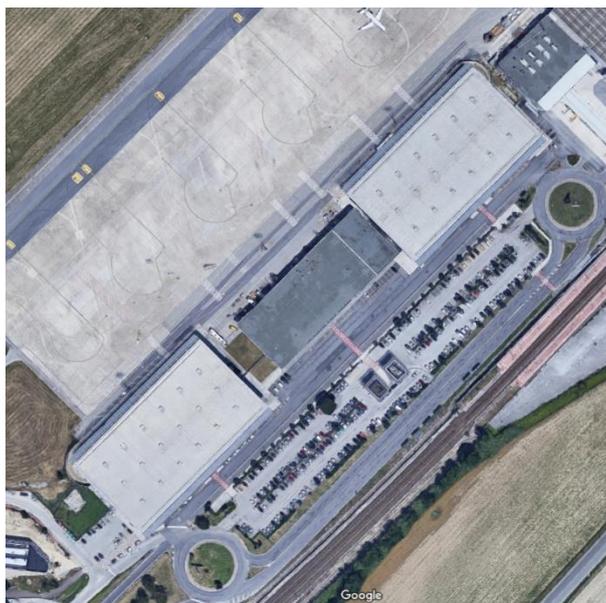


Fig. 31 Aeroporto Raffaello Sanzio Falconara

Per mitigare l'UHI si è optato per un intervento riabilitativo riguardante determinati spazi delle suddette aree.

Per quanto riguarda il Porto, l'intervento interessa l'intera pavimentazione (due corsie una per senso di marcia) così come le aree di sosta, carico e scarico merci, stesso intervento per l'aeroporto Raffaello Sanzio salvo che per l'area di sosta e di circolazione degli aeromobili, poiché il tipo di riabilitazione oggetto della Tesi di laurea non garantisce quelle caratteristiche prestazionali che sono proprie dei carichi portati dagli aeromobili.

La strada e le aree di sosta sono ricoperte attualmente da conglomerato bituminoso nero convenzionale e presentano parti più recenti e altre più datate.

Le aree di riferimento sono rispettivamente di 1000000 m² e di 160000 m².

5.2 Caratteristiche dei materiali

I materiali oggetto dell'intervento riabilitativo sono stati usati per i seguenti fini:

- Migliorare le condizioni di confort termico delle zone mitigando l'effetto isola di calore urbana;
- Garantire la sicurezza alla guida evitando abbagliamento indesiderato.

Per soddisfare gli obiettivi, si è scelto di sostituire il conglomerato bituminoso convenzionale "nero" esistente, che presenta una riflettanza solare prossima a 0.05 quando di recente costruzione e prossima a 0.12 quando in opera già da qualche anno, con uno slurry seal a strato sottile di colore

giallo chiaro caratterizzato da riflettanza solare pari a 0.35 ed emissività 0.9 (Kyriakodis, 2017). Per evitare problemi di abbagliamento si è optato per questa soluzione poiché il materiale presentava una riflessività elevata nel vicino infrarosso rispetto alla parte visibile. Il materiale è costituito da una miscela di legante elastomerico con pigmenti riflettenti all'infrarosso ed aggregati, mentre l'applicazione finale avverrà mediante apposite macchine addette alla stesura dello slurry a temperatura ambiente e in strati molto sottili (pochi mm di spessore). In genere, alle operazioni di stesa non segue alcuna rullatura, con il vantaggio di poter riaprire rapidamente al traffico.

È stato valutato anche il potenziale degrado ottico e quindi la diminuzione della riflettività nel tempo e si è scoperto che dopo circa 6 mesi di uso continuo del materiale, il conglomerato ha diminuito la sua riflettività da 0.35 a 0.17 e questo per via del deposito di gomma da pneumatici delle automobili (Kyriakodis, 2017). Degrado che viene del tutto recuperato andando ad effettuare un trattamento di manutenzione ordinaria con solvente umido sulla pavimentazione.

Per l'area aeroportuale si è scelto di effettuare un ulteriore intervento di mitigazione mediante l'applicazione di una vernice bianca con riflettanza solare pari a 0.8 (Keith, 2010) sulle superfici superiori (in PVC e in calcestruzzo) degli edifici che compongono il distretto aeroportuale.

5.3 ENVIMET

Per prevedere le prestazioni termiche delle aree prese in considerazione, prima e dopo l'intervento riabilitativo, è stato utilizzato come modello di simulazione numerica: Envimet. Come già scritto in precedenza si tratta di un modello a 3 dimensioni progettato per simulare le interazioni superficie-pianta-aria con l'ambiente urbano. Si basa sulle equazioni di Reynolds e di Navier-Stokes e fornisce sia risoluzione spaziale che temporale per un boundary layer urbano. Si è scelto Envimet poiché ha caratteristiche non disponibili in altri modelli (ad esempio un modulo microclima dettagliato e un modulo vegetazione). In input richiede i dati meteorologici e le caratteristiche del dominio.

5.3.1 Area Input Files

Il primo passo consiste nella realizzazione di un modello tridimensionale similare alle zone di studio considerate, andando nella sezione Spaces del programma ENVI-met.

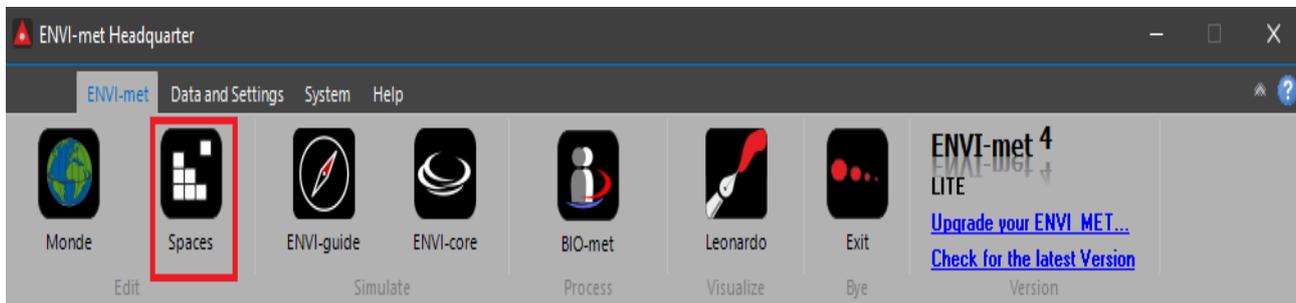


Fig. 32 Sezione Spaces

All'apertura del programma, alla voce Edit settings/Create New Area è possibile inserire la località del sito di interesse o tramite una ricerca o inserendo le opportune coordinate.

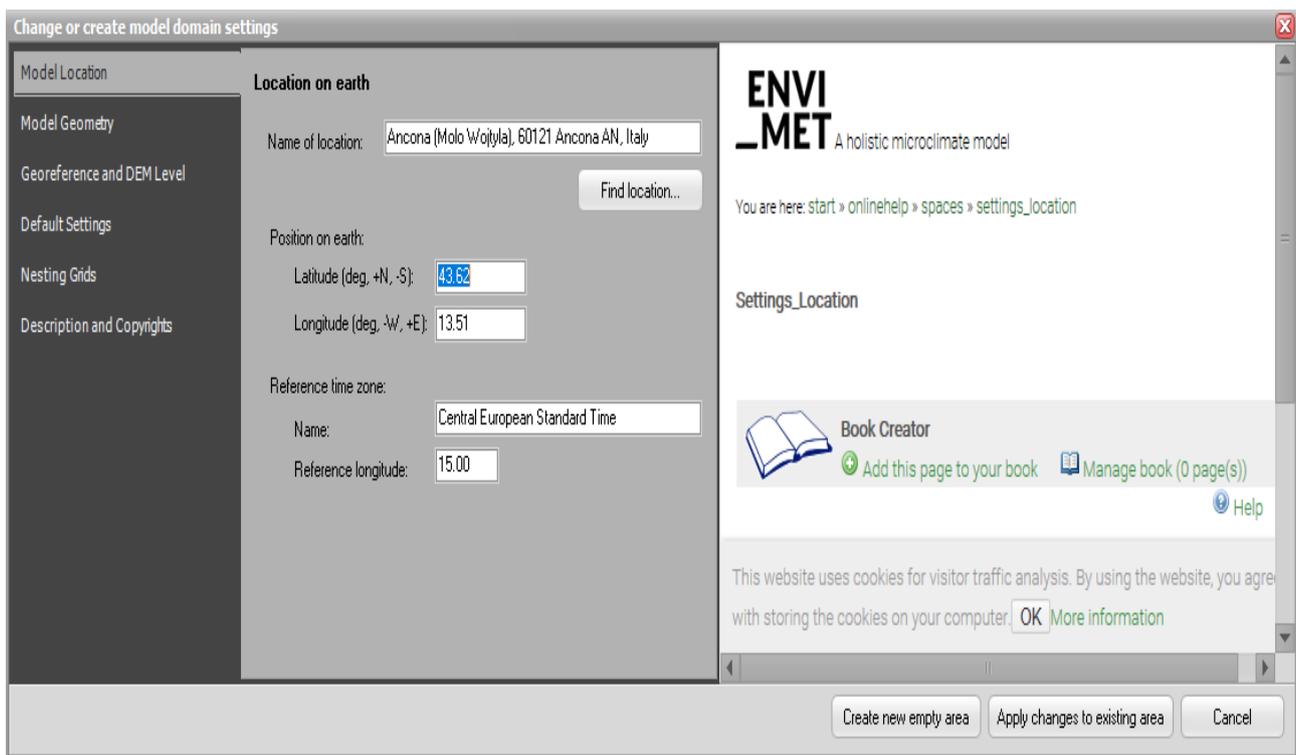


Fig. 33 Località del modello

Mentre Model Geometry consente di stabilire il dominio di calcolo per i nostri modelli.

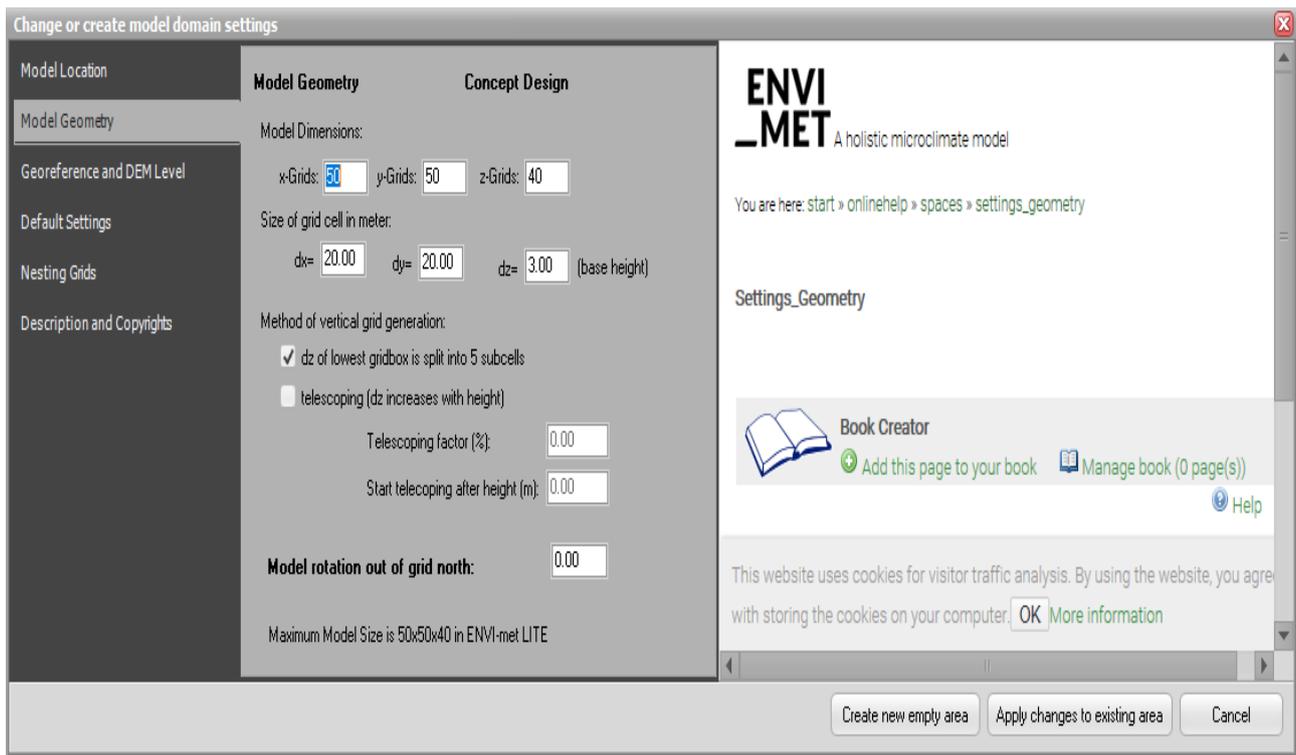


Fig. 34 Geometria del modello

Le dimensioni fisiche inserite per il sito portuale corrispondono a 1000m(x)x1000m(y)x120m(z) ed il dominio di calcolo consiste di 50x50x40 celle su ogni asse dove ogni cella è 20mx20mx3m, mentre le dimensioni fisiche inserite per il sito aeroportuale corrispondono a 400m(x)x400m(y)x120m(z) ed il dominio di calcolo consiste di 50x50x40 celle su ogni asse dove ogni cella è 8mx8mx3m. Si è scelto di usare un dominio di questo tipo poiché il massimo fra quelli che la versione lite permette.

5.3.2 MODELLAZIONE DELLE AREE

Stabilito il numero di grids e la grandezza di ciascuna, si procede verso la vera e propria modellazione delle aree.

ENVI.met permette di importare, nella sezione Digitize, immagini del sito di interesse in formato Bitmap, fornendo così al progettista dell'area un punto di riferimento nella modellazione.

Una volta acquisita l'immagine, il primo step consiste nel realizzare il modello del terreno (DEM), fornendo al programma cella per cella la quota del terreno.

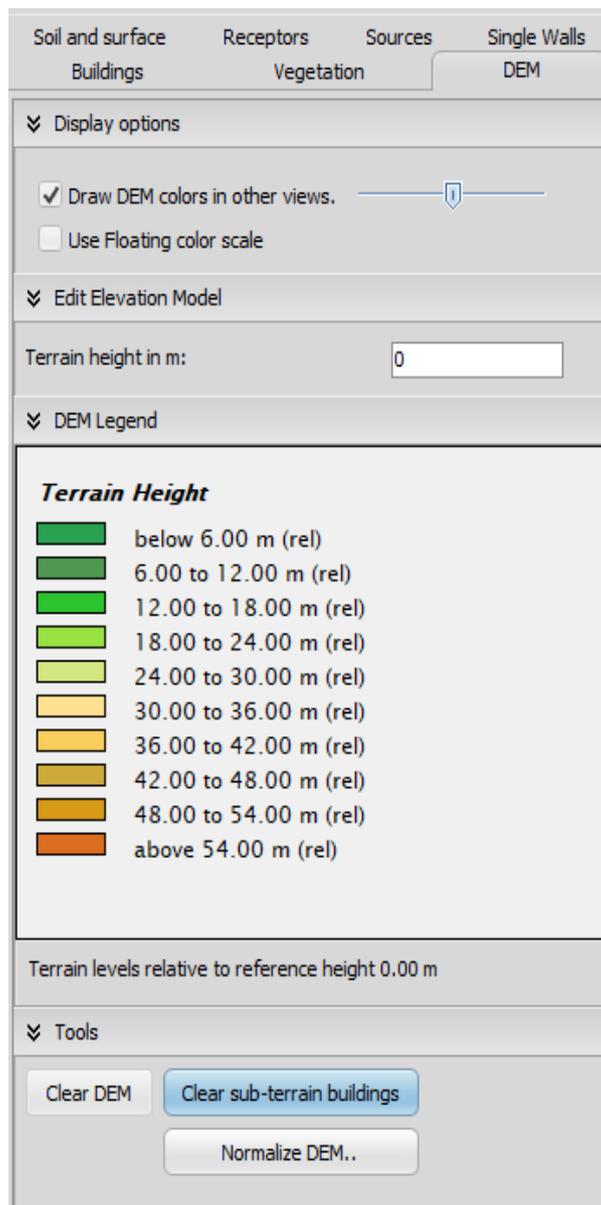


Fig. 35 Sezione DEM adibita alla creazione delle curve di livello

Il secondo step è utile per indicare la stratigrafia del terreno, si può scegliere fra una libreria di suoli e superfici di default o crearne di propri.

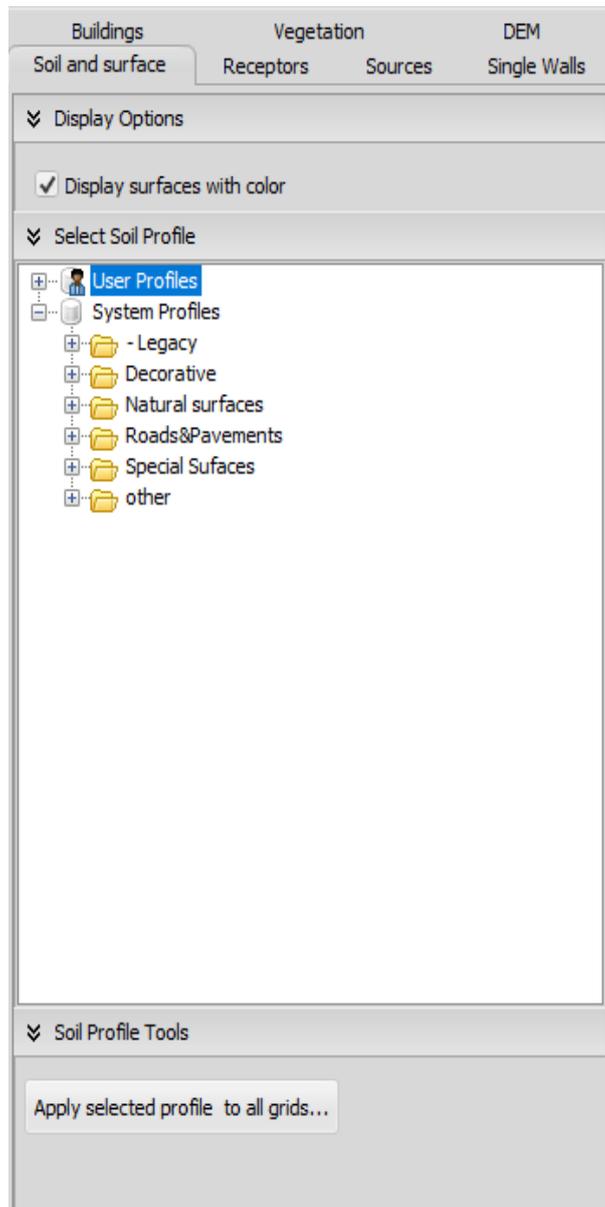


Fig. 36 Sezione Soil and Surface

Come terzo step sono stati modellati gli edifici, andando ad inserire la quota e stabilendo a priori edificio per edificio i materiali delle facciate così come per le coperture.

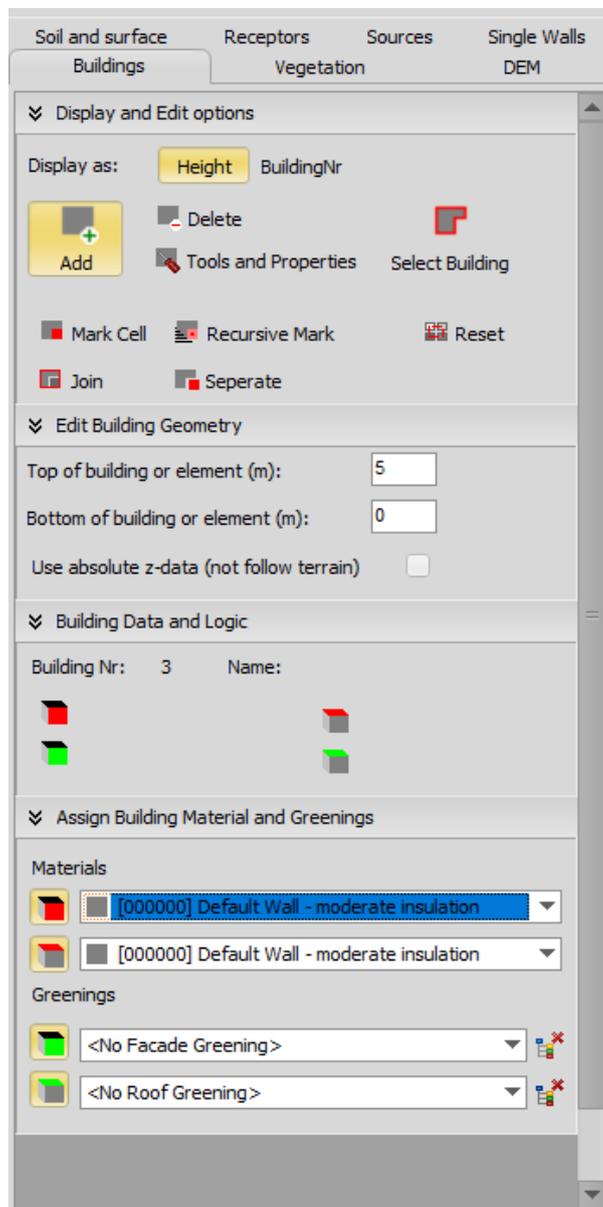


Fig. 37 Sezione Buildings

Nel quarto step è possibile inserire i tipi di vegetazione andando anche in questo caso a scegliere fra numerosi di default o in alternativa a crearsene ex novo.

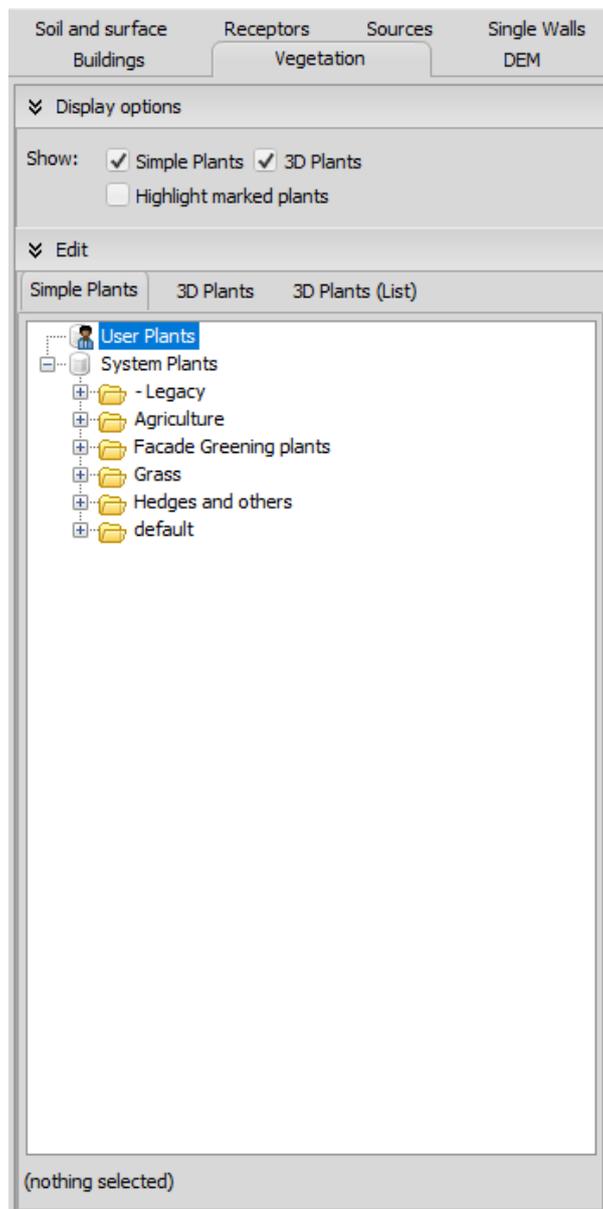


Fig. 38 Sezione Vegetation

Gli Steps sopra citati possono essere tranquillamente scambiati di ordine in base alle modalità preferite dall'utente e a questi se ne possono aggiungere di ulteriori in virtù del livello di dettaglio che il progettista vuole dare al sito.

Ecco illustrati i risultati finali delle modellazioni rispettivamente del Porto e dell'Aeroporto di Ancona.

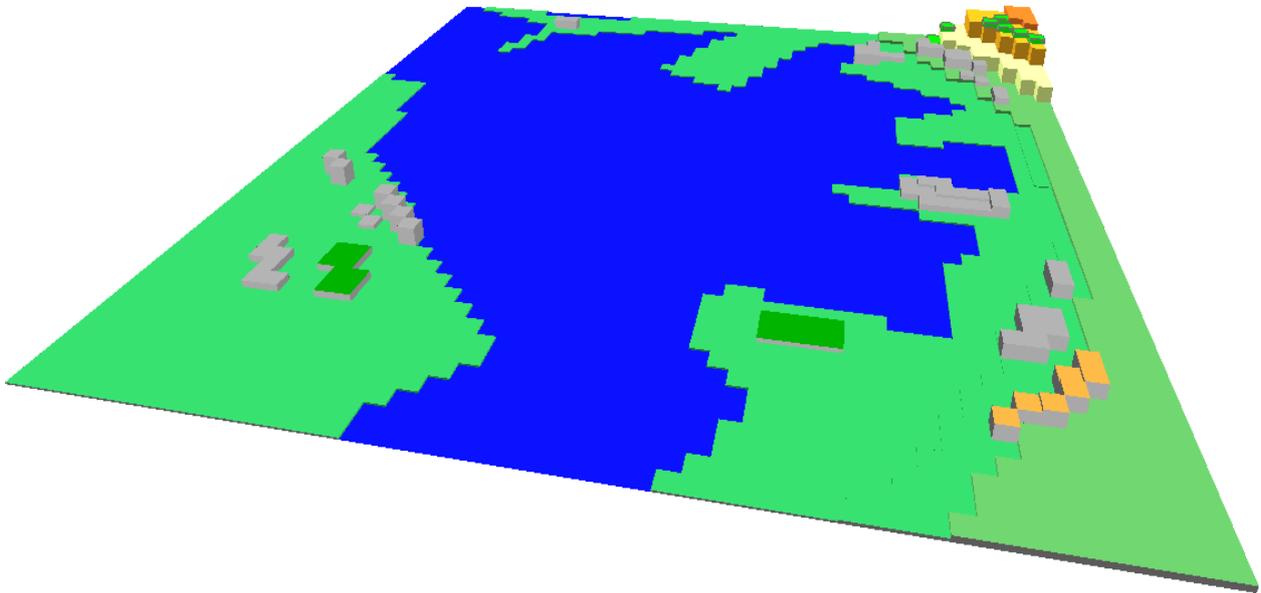


Fig. 39 Modello 3D del Porto di Ancona

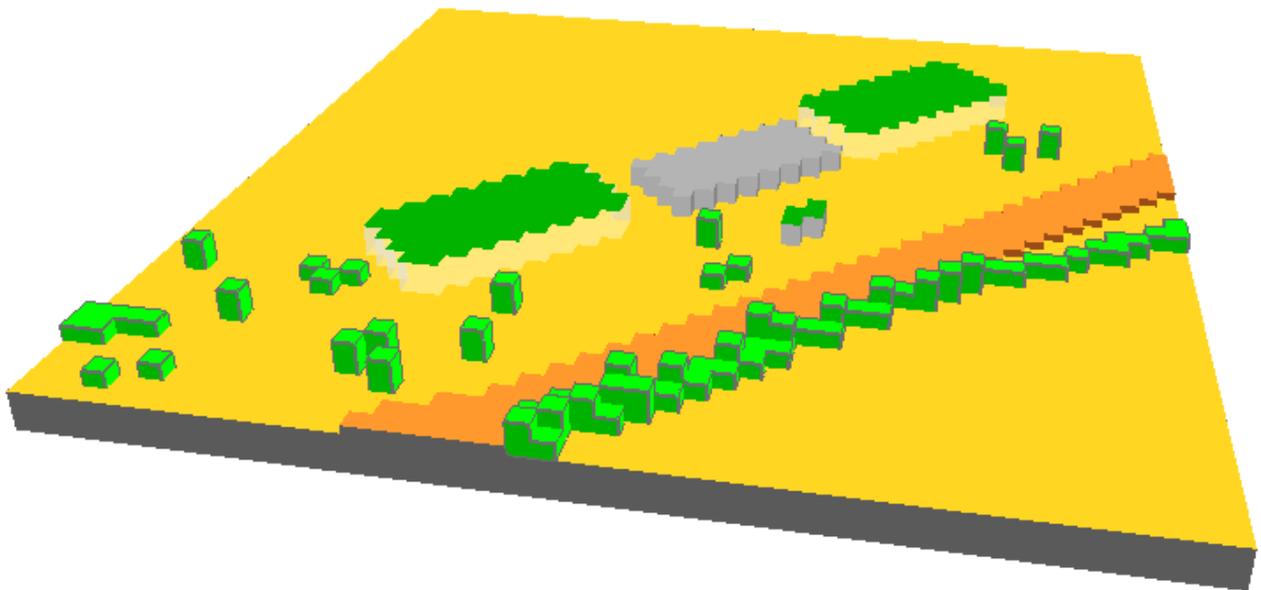


Fig. 40 Modello 3D dell'Aeroporto Raffaello Sanzio

Le due aree sono state modellate mantenendo inalterato l'orientamento rispetto al Nord. e per evitare problemi numerici causati dall'interferenza del modello con le dinamiche interne, si è scelto di non modellare gli edifici a bordo modello. L'importazione delle curve di livello ed il disegno degli edifici possono essere fatti da software diversi da ENVI-met, come ad esempio Sketchup e Rhinoceros, i quali hanno un'interfaccia adibita esclusivamente al disegno a livelli di dettaglio che lo spazio di lavoro di ENVI-met non fornisce. Le modalità d'uso di questi programmi non verranno riportate in questa tesi di laurea.

5.3.3 ENVI-guide

Dopo aver realizzato il modello geometrico delle aree di interesse, il secondo passo permette di realizzare il file vero e proprio della simulazione e per fare ciò ci si avvale della sezione ENVI-guide.

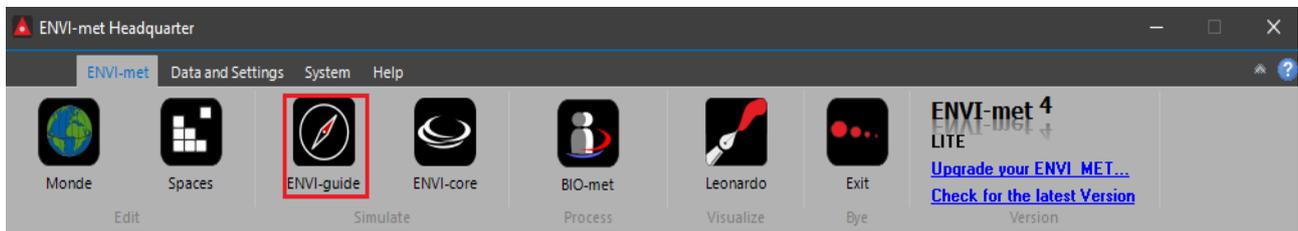


Fig. 41 ENVI-guide

Al suo interno ci sono una serie di sezioni la prima delle quali consente di creare una nuova simulazione.

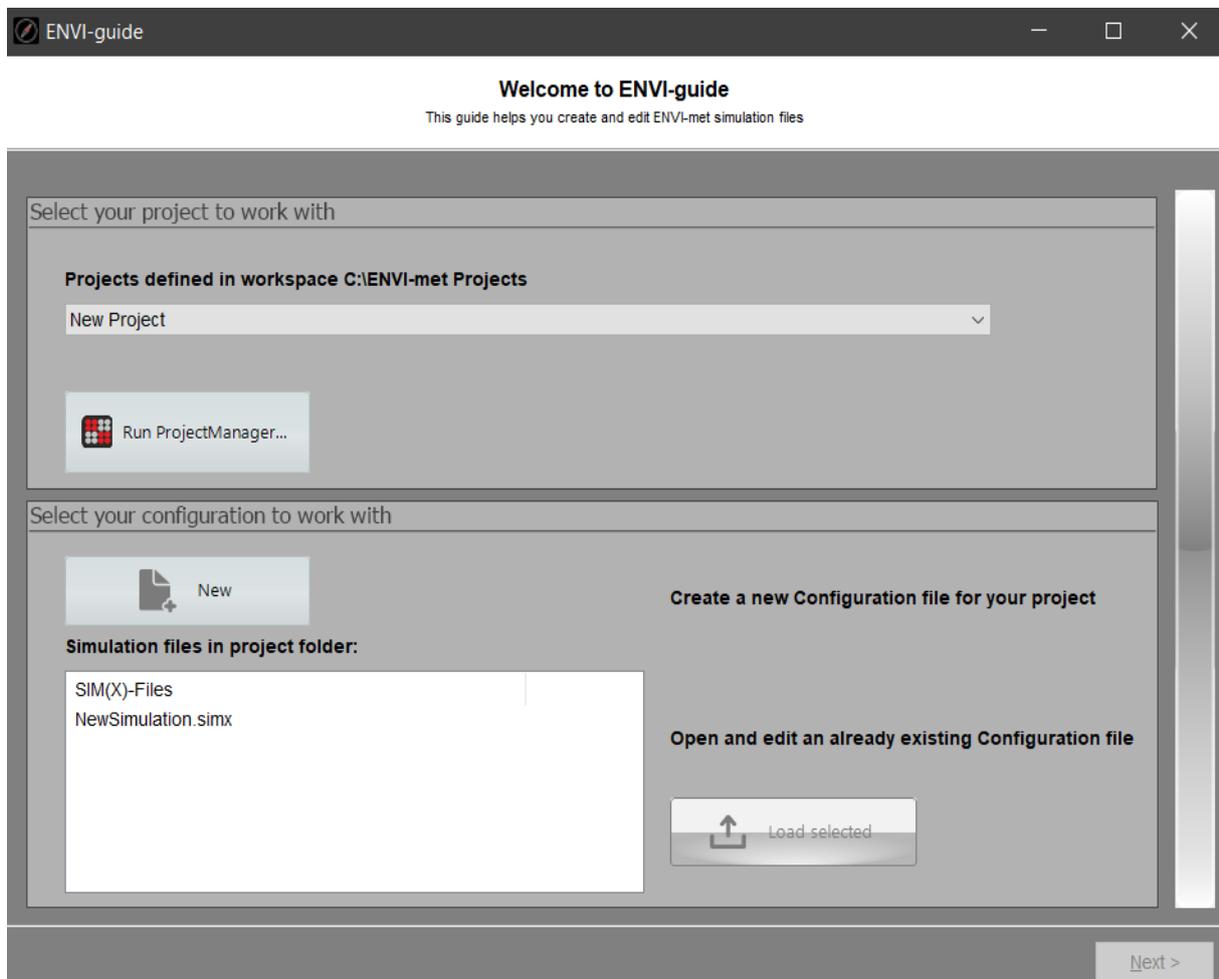


Fig. 42 Sezione ENVI-guide adibita alla creazione di una nuova simulazione

Creato il file si apre un'interfaccia in cui è possibile inserire una serie di dati generali:

- Il giorno della simulazione,
- L'orario di inizio simulazione,
- La durata totale del tempo di simulazione
- Il nome della cartella o del file della simulazione.

ENVI-guide

GENERAL SIMULATION SETTINGS

Start and duration of model run

Start Date (DD.MM.YYYY): 01.07.2020

Start Time (HH:MM): 00 00

Total Simulation Time (h): 24

Basic names and folders

Full name of simulation task: NewSimulation
This is used to identify your simulation and to generate labels

Short name for file name generation: NewSimulation
Define the root name for your simulation files.
ENVI-met will add some information to this name, so keep it simple but unique

Base folder for model output: NewSimulation_output

< Back Next >

Fig. 43 ENVI-guide sezione General simulation settings

Inseriti i dati generali nella successiva sezione si va ad associare alla simulazione il file 3D delle aree modellate con Spaces.

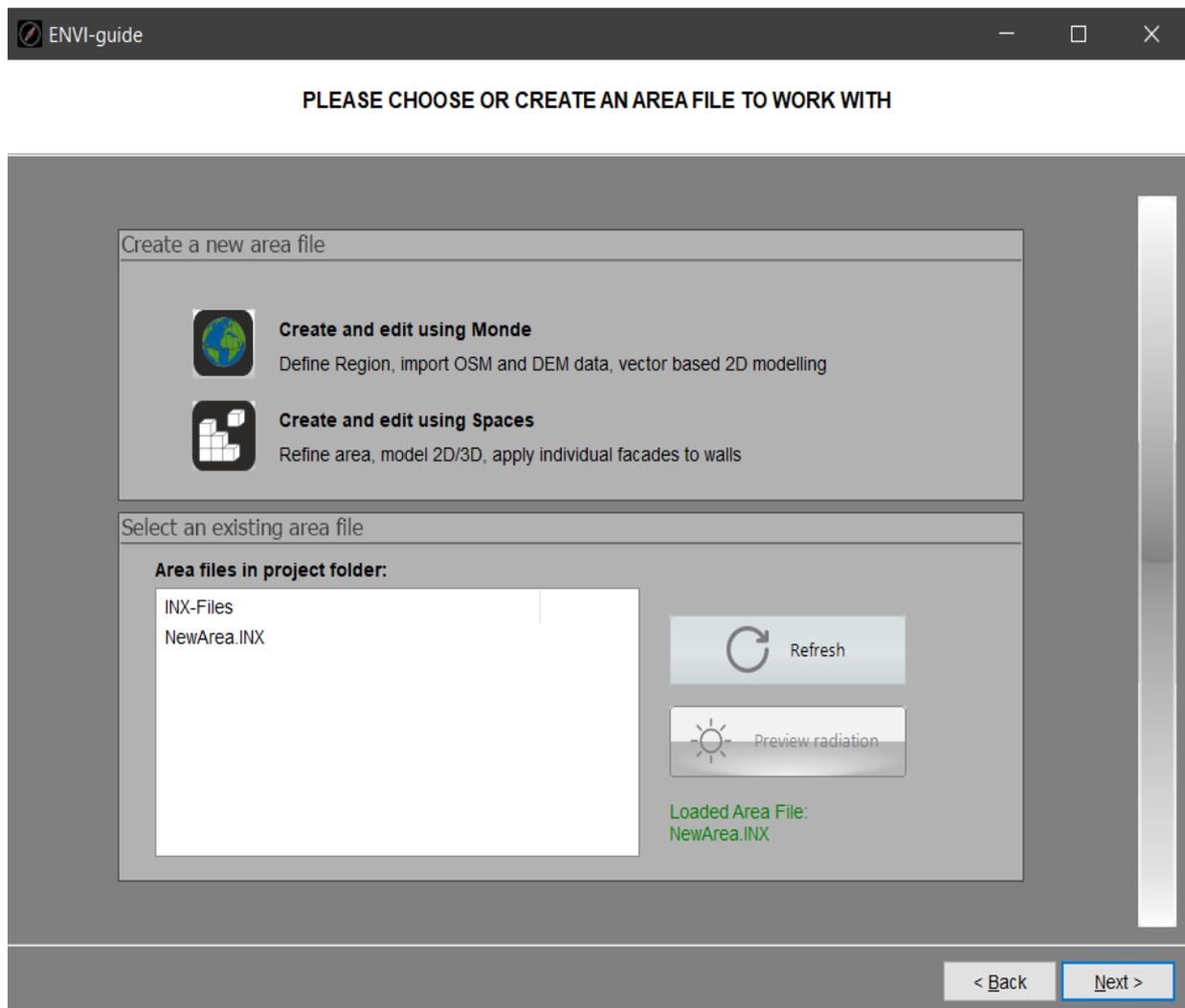


Fig. 44 ENVI-guide sezione adibita alla selezione del file area

Solo dopo questi steps si ha la possibilità di inserire i primi dati metereologici:

- Velocità del vento a 10 m di altezza dell'ora di inizio simulazione;
- Direzione del vento nell'ora di inizio simulazione;
- Rugosità del sito;
- Temperatura minima e massima relative all'arco simulativo di interesse;
- Umidità relativa minima e massima relativa all'arco simulativo di interesse.

The screenshot shows a software window titled "ENVI-guide" with standard window controls (minimize, maximize, close). The main content area is titled "BASIC METEOROLOGICAL SETTINGS". Inside this area, there is a sub-window titled "Initial meteorological conditions" which contains the following settings:

- Wind uvw**
 - Wind speed measured in 10 m height (m/s): 4.21
 - Wind direction (deg): 222.91 (0= from North...180= from South...)
 - Roughness length at measurement site: 0.010
- Temperature T**
 - Min. and max. temperature of atmosphere (°C): 22.81 (min.) and 26.61 (max.)
- Humidity q**
 - Min. and max. relative humidity in 2m (%): 53.21 (min.) and 66.00 (max.)

At the bottom right of the window, there are two buttons: "< Back" and "Next >".

Fig. 45 ENVI-guide Dati Metereologici di base

Una compilazione più attenta dei dati di temperatura e umidità relativa viene fatta invece nell'interfaccia successiva.

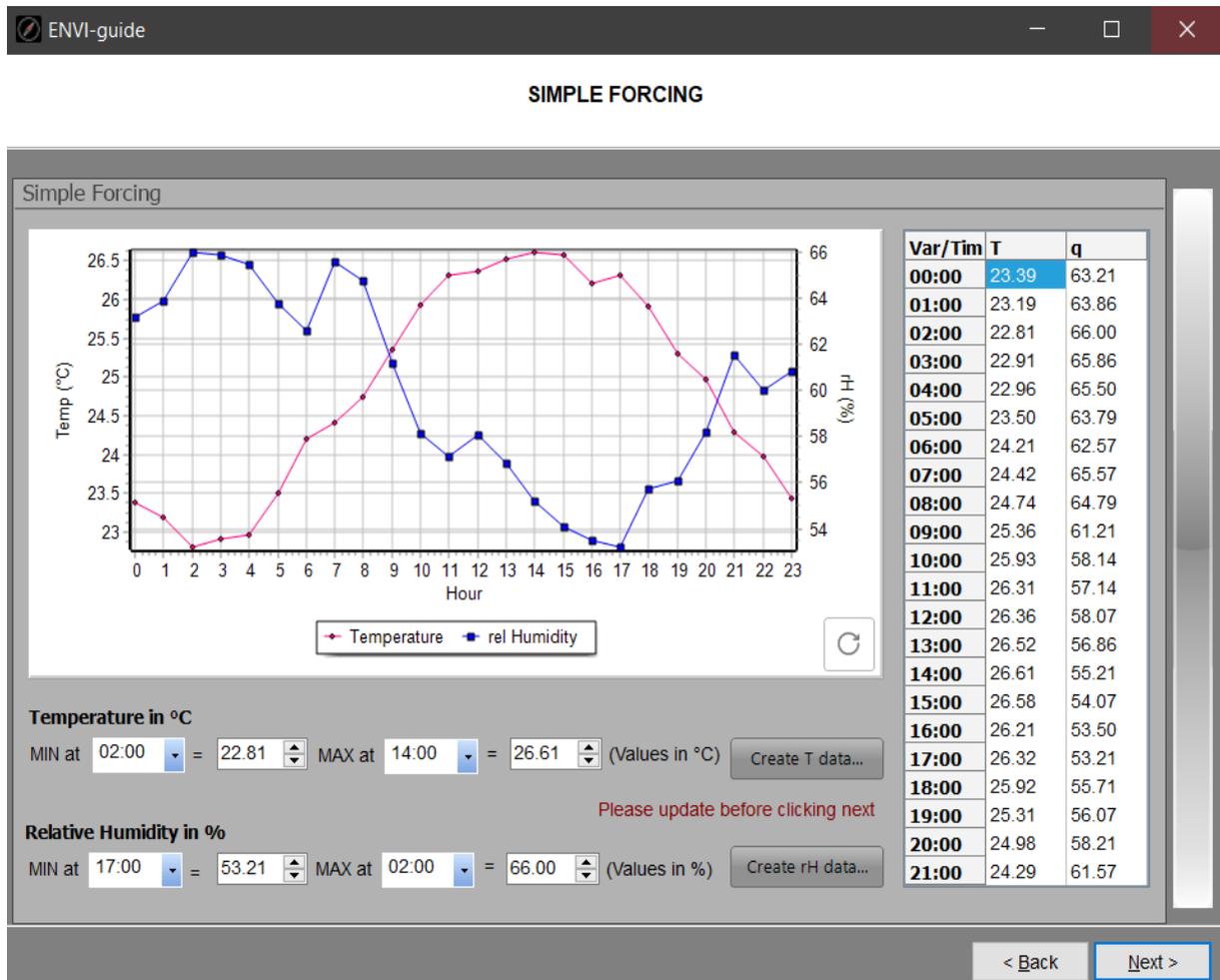


Fig. 46 ENVI-guide Temperatura e Umidità relativa

ENVI-guide contiene anche una successiva sezione adibita all'inserimento dei dati relativi del suolo, dell'inquinamento e della nuvolosità.

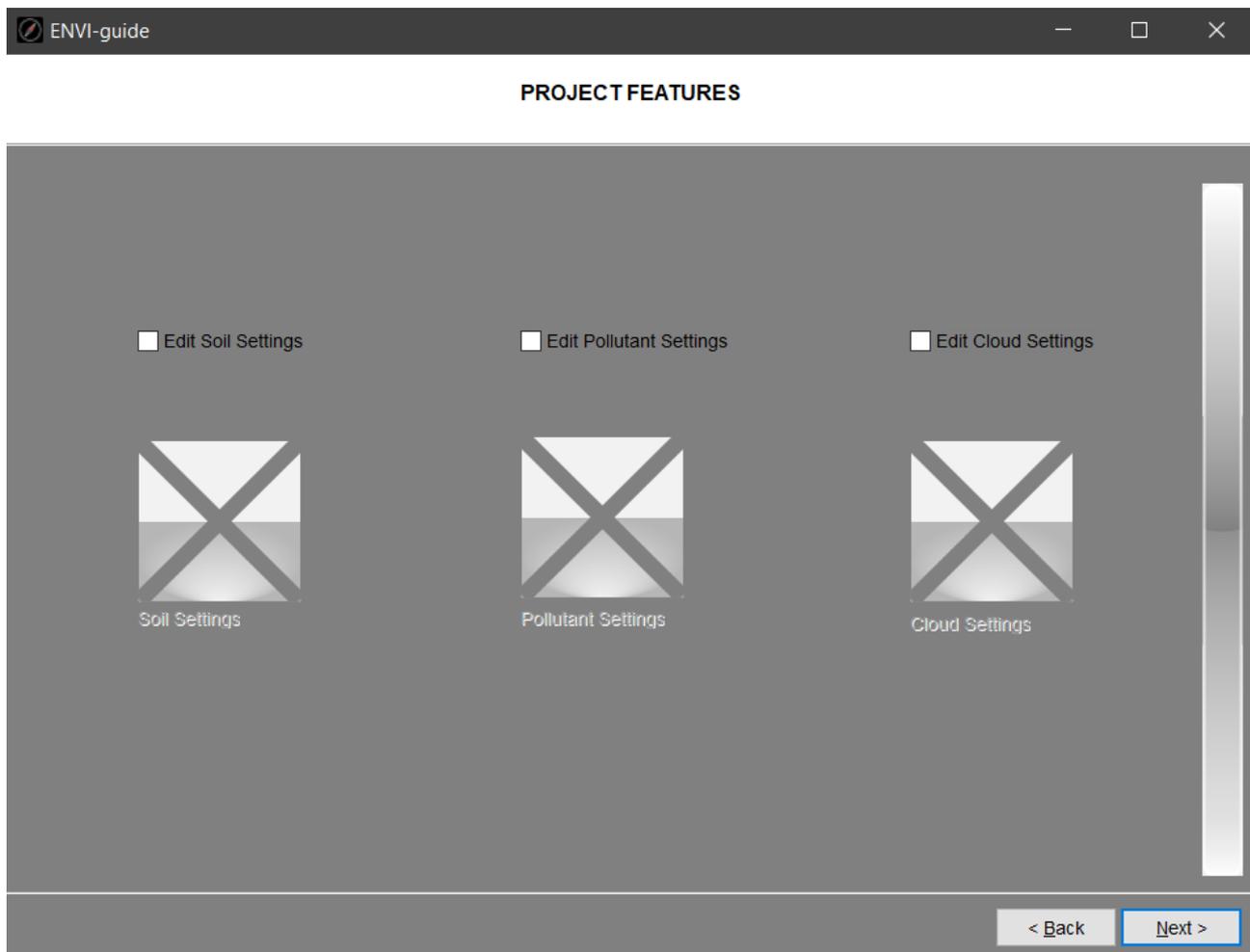


Fig. 47 ENVI-guide soil, pollutant and cloud settings

Per poter utilizzare questo strumento di simulazione vi è la necessità di reperire i valori climatici di riferimento per entrambe le aree oggetto di studio. Temperatura ambiente, umidità relativa, velocità e direzione del vento sono stati quindi raccolti da due stazioni meteorologiche.

Per l'area portuale, la stazione è ubicata presso la darsena di S.Primiano-Molo Nord mentre il palo meteorologico è ubicato presso il Porto turistico Marina Dorica alla Lat 43°36'34.71" e Long 13°28'54.74". La stazione mareografica è dotata di caposaldi altimetrici. Ogni caposaldo è riferito al livello medio del mare misurato a Genova dall'antico mareografo Thompson. I caposaldi sono contrassegni metallici che determinano la quota altimetrica mediante livellazione di alta precisione condotta a partire dalle linee principali stabilite dall'IGM. Dalla data del 16/10/09 il valore che compare con la denominazione "livello idrometrico" viene misurato con un nuovo sensore radar denominato SIAP+MICROS TLR con precisione millimetrica. ISPRA garantisce l'uniformità della

misura con la serie di dati precedenti a tale data prodotti con il sensore SIAP+MICROS ID0710 basato su un trasduttore ad ultrasuoni avendone verificato il preciso allineamento.

Per quanto riguarda i parametri di Temperatura dell'aria e di Umidità relativa sono stati misurati ad intervalli di tempo 1h, mentre ogni 10 minuti per velocità e direzione del vento.

Per l'area aeroportuale di Falconara sono stati utilizzati invece i dati della stazione meteorologica di Camerano opportunamente corretti.

In entrambi i casi sono state prese come periodo di riferimento per le simulazioni le prime due settimane del mese di luglio e si è proceduto ad un'analisi statistica dei dati, alla ricerca del giorno rappresentativo. Si è scelto il mese di luglio come intervallo di tempo poiché riconducibile al periodo dell'anno di massima radiazione solare.

5.3.4 ENVI-core

Modellate entrambe le aree attraverso Spaces e inseriti i dati meteorologici in ENVI-guide, il prossimo passo è l'utilizzo della sezione ENVI-core, il vero motore di ENVI-met in grado di unire i due ambiti precedentemente trattati.

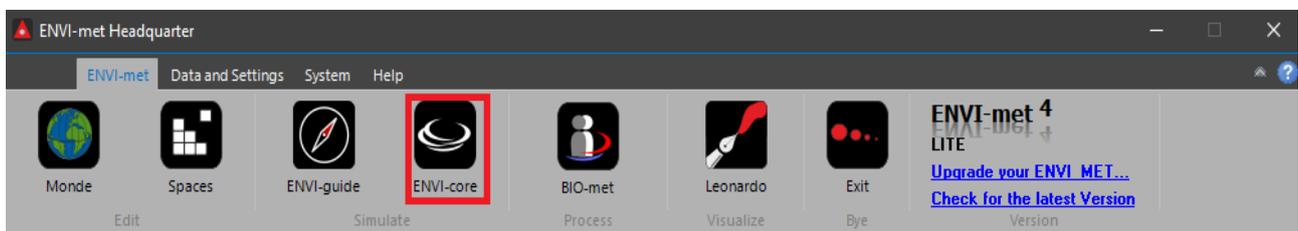


Fig. 48 ENVI-core

La prima cosa da fare è selezionare la libreria di materiali utilizzata nella modellazione e successivamente caricare il file ottenuto da ENVI-guide. ENVI-core effettua un check e a controllo ultimato consente di far partire la simulazione attraverso il tasto Run Simulation.

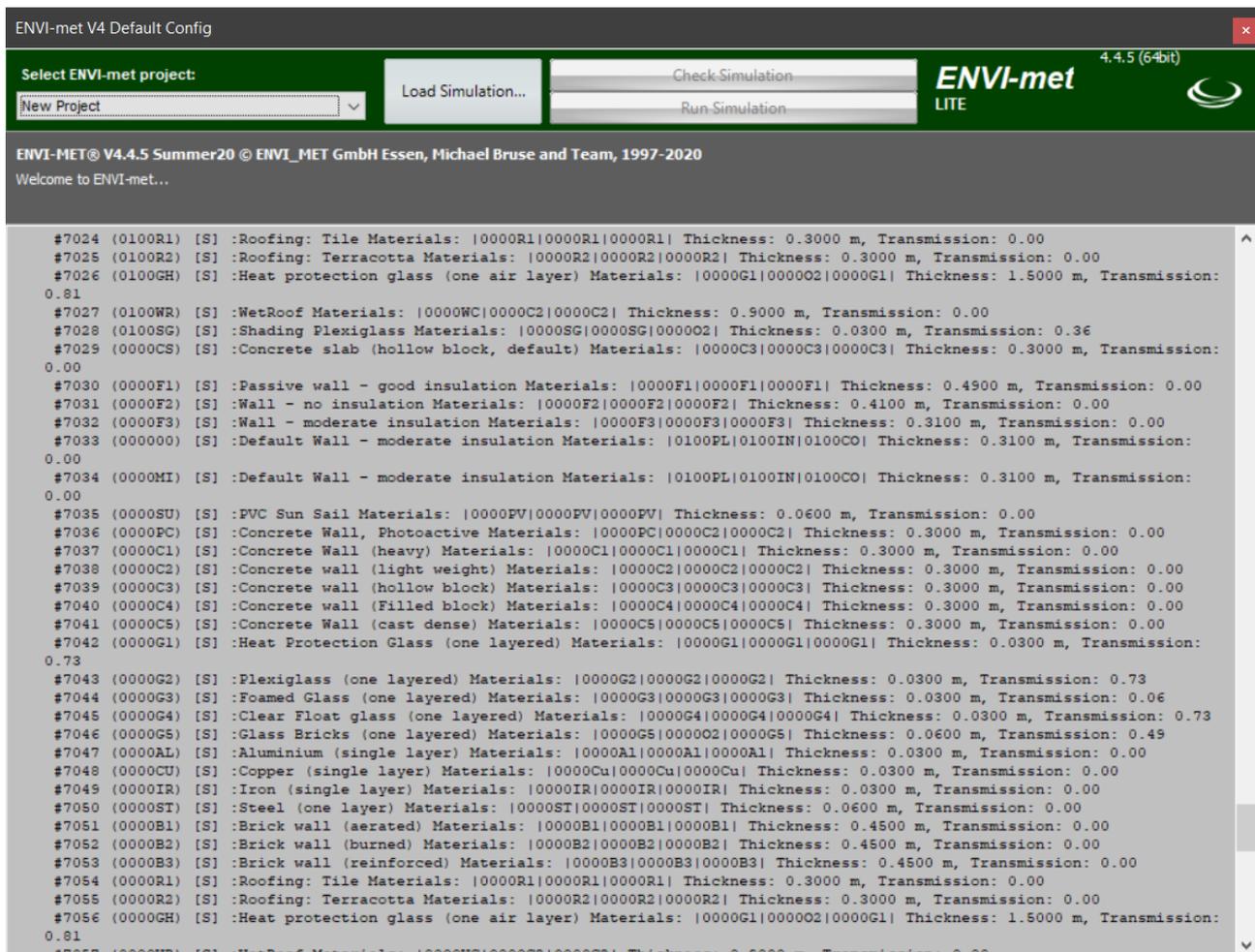


Fig. 49 ENVI-core sezione adibita al lancio della simulazione

Il processo simulativo impiegherà un tempo differente in virtù della quantità di ore che si è scelto di simulare ed in base alla versione del software utilizzata. La versione ENVI-met lite consente l'uso di un solo core per volta a disposizione del proprio computer e ciò si è tradotto in parecchie ore necessarie per avere il file di output per ciascuna simulazione.

5.3.5 Biomet

A processo ultimato ENVI-core restituisce come output una cartella contenente numerose sottocartelle. Prima di passare all'ultimo passo, ovvero alla lettura dei risultati, occorre utilizzare la sezione del software adibita al calcolo degli indici di confort termico: Biomet.

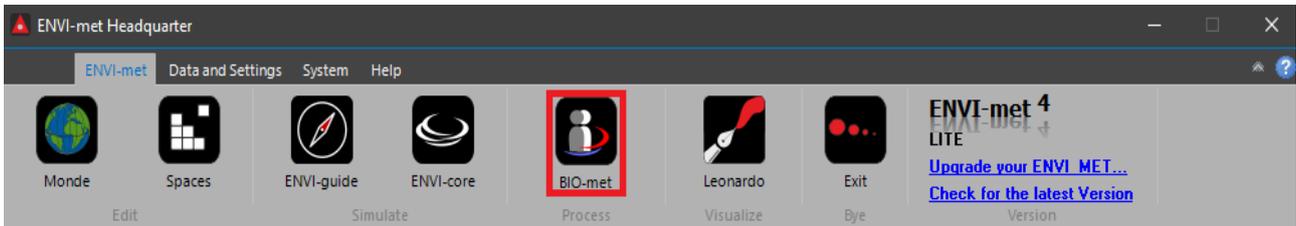


Fig. 50 Biomet

Andando a selezionare la cartella Atmosphere di output della simulazione nella sua apposita locazione nel computer, Biomet consente di selezionare la fascia oraria di preferenza o anche l'intero arco giornaliero e effettuerà il calcolo del PMV, del PPD e della TMR sulla base di un soggetto di default: persona di 35 anni, di peso 75 chili e di altezza 1.75 m, sempre da programma si considera un' insolazione tipo del 90% ed un determinato indice metabolico. Questi dati possono essere cambiati e valutare ad esempio gli indici di benessere termico considerando come soggetti dei bambini o persone più anziane.

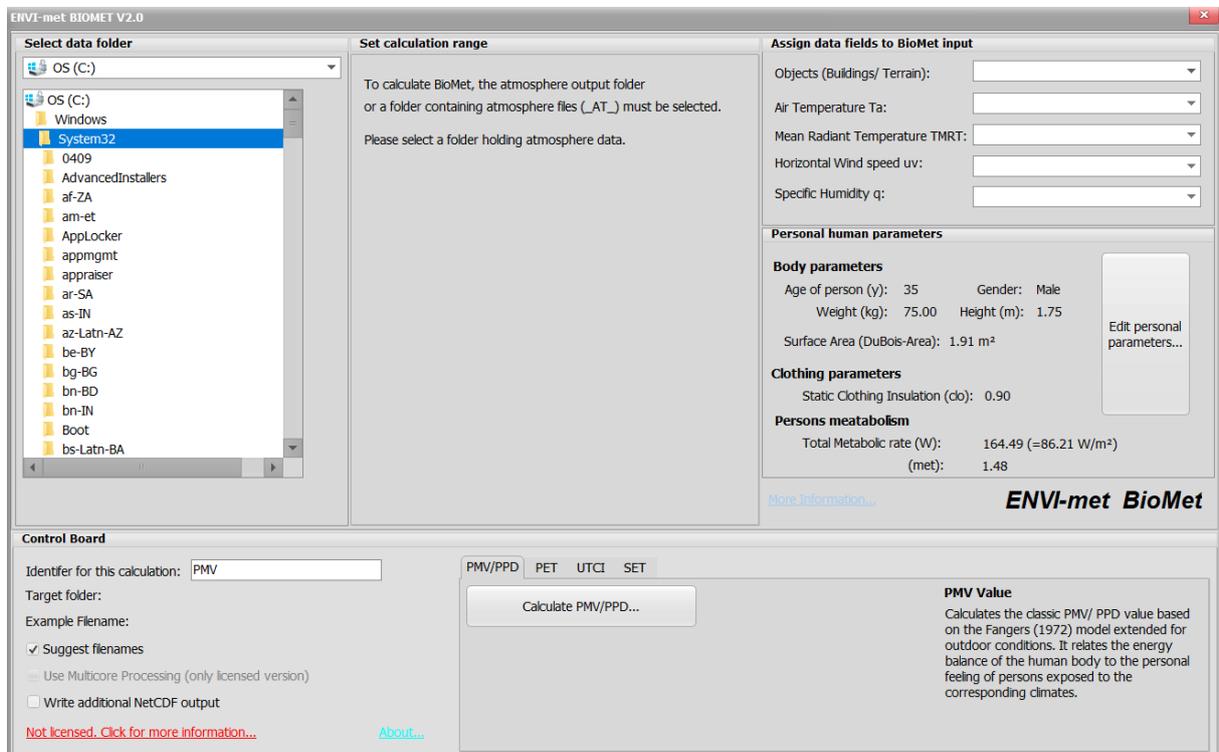


Fig. 51 Biomet sezione adibita al calcolo degli indici di benessere termico PMV, PPD e TMR

5.3.5.1 Gli indicatori

Gli indicatori utilizzati per l'analisi delle simulazioni sono:

- TMR (Temperatura Media Radiante);
- PMV (Predicted Mean Vote);
- PPD (Percentage of Person Dissatisfied).

5.3.5.2 Temperatura Media Radiante

La temperatura media radiante è uno tra i più importanti parametri ambientali relativi al bilancio energetico del corpo umano. Essa infatti esprime gli scambi termici per irraggiamento tra corpo umano e superfici di un ambiente, e per questo è utilizzata ai fini della valutazione del comfort termoigrometrico. Tali scambi dipendono, com'è noto, oltre che dalle temperature delle superfici, anche dalla loro posizione reciproca, espressa attraverso i fattori di vista. Dal punto di vista tecnico, la temperatura media radiante (TMR) è definita come la temperatura uniforme di una cavità nera fittizia che, racchiudendo degli individui, scambia per irraggiamento con essi la stessa potenza termica scambiata dalle superfici reali, generalmente disomogenee, che delimitano l'ambiente in cui gli individui normalmente si trovano (ASHRAE, 2009). Nel calcolare la temperatura media radiante, ENVI-met tiene in considerazione tutti i flussi radianti, sia le radiazioni solari dirette, diffuse e riflesse, sia i flussi della radiazione ad onda lunga provenienti dall'atmosfera, dal terreno e dai muri, ed è in grado di generare i valori di tale parametro per ogni cella del modello, al variare dell'altezza dal suolo (Ali-Toudert F., 2005,2007). ENVI-met calcola la TMR per un corpo di forma cilindrica a partire dall'equazione seguente (Huttner, 2009):

$$TMR = \left(\frac{1}{\sigma} \left(Q_{lw,in} + \frac{ak}{\epsilon} * (Q_{sw-diff,in} + Q_{sw-dir,in}) \right) \right)^{\frac{1}{4}}$$

dove $Q_{lw,in}$ indica la radiazione ad onda lunga ("in" indica che il flusso è in ingresso rispetto al corpo cilindrico considerato), $Q_{sw-dir,in}$ e $Q_{sw-diff,in}$ indicano le quote di radiazione solare ad onda corta diretta e diffusa, il coefficiente di emissione del corpo umano (ϵ) è posto a 0.97, il coefficiente di assorbimento del corpo umano della radiazione ad onda corta (ak) è scelto pari a 0.7 e σ è la costante

di Stefan–Boltzmann ($5.67 * 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K}^4)$). Si assume poi che la radiazione ad onda lunga Q_{lw} , in (“in” indica che il flusso è in ingresso rispetto al corpo cilindrico considerato) provenga per il 50 % dal cielo, edifici e vegetazione, e per il restante 50 % dalla superficie del terreno:

$$Q_{lw,in} = 0.5 * (v_{f_{veg}} \epsilon_{veg}^* \sigma T_{veg}^{*4} + v_{f_{bldg}} \epsilon_{bldg}^* \sigma T_{bldg}^{*4} + v_{f_{sky}} Q_{lw,sky} + v_{f_{bldg}} (1 - \sigma_{bldg}^*) Q_{lw,sky}) + 0.5 * (\sigma \epsilon_{ground} T_{ground}^4)$$

I fattori di vista v_f danno la percentuale di vegetazione/edifici/cielo che può essere vista da un punto di una griglia specifica. Mentre il corretto approccio fisico richiederebbe di calcolare tutti i flussi radiativi ad onda lunga basandosi sull'emissività e sulle temperature di ogni elemento entro la vista, ENVI-met utilizza i valori medi di emissività (ϵ^*) e di temperatura (T^*) per tutte le piante e gli edifici all'interno dell'area del modello. La radiazione incidente ad onda lunga proveniente dal cielo invece $Q_{lw, sky}$ è calcolata sulla base della temperatura e dell'umidità dell'aria. Per la radiazione ad onda lunga proveniente dal suolo, vengono prese in considerazione solo l'emissività e la temperatura superficiale delle griglie in analisi. La radiazione incidente ad onde corte diffusa $Q_{sw-diff}$, in invece viene calcolata secondo:

$$Q_{sw-dir,in} = 0.5 * (v_{f_{bldg}} r_{f_{bldg}}^* Q_{sw-dir,sky} + v_{f_{sky}} Q_{sw-diff,sky}) + 0.5 * (r_{f_{ground}} Q_{sw,ground})$$

dove r_f è la riflettanza (o albedo) e $Q_{sw, ground}$ è la radiazione globale ad onde corte alla superficie del suolo della griglia corrispondente. La radiazione incidente diretta ad onda corta, ossia $Q_{sw-dir,in}$, è calcolata a partire dalla radiazione diretta ad onde corte all'interno della griglia, moltiplicata per un fattore di proiezione pf : $Q_{sw-dir,in} = pf * Q_{sw-dir}$. Questo fattore di proiezione dipende dall'angolo azimutale del sole θ :

$$= 0.42 * \cos \theta + 0.043 * \sin \theta$$

La temperatura media radiante presenta solitamente il tipico andamento rappresentato in Figura 52, dal momento che è strettamente collegata ai flussi radiativi percepiti da un individuo che si trova in piedi: intorno a mezzogiorno si assiste ad un primo lieve calo della TMR, seguito da un aumento nelle ore pomeridiane, e infine da una diminuzione notevole intorno alle ore serali. Questo perché alle ore 12:00 il sole si trova nel punto più alto e mentre ci si potrebbe aspettare i maggiori valori di radiazione su una superficie orizzontale, l'area proiettata sulla superficie dove essa colpisce il corpo

umano è relativamente piccola per un individuo che si trova in piedi, essendo limitata alla sola testa e a parte delle spalle. Al contrario, quando il sole si trova più basso all'orizzonte, la radiazione potrebbe anche non essere così forte come quella a mezzogiorno, ma essa colpisce una superficie maggiore del corpo, dando quindi una sensazione di una temperatura maggiore. L'intensità della TMR infine tende a diminuire considerevolmente quando ormai il sole, nelle ore successive al tramonto (intorno alle 19), scompare oltre l'orizzonte. Per tal motivo la temperatura media radiante è notevolmente differente dalla temperatura potenziale: mentre infatti quest'ultima rappresenta una misura assoluta della temperatura dell'aria e dell'ambiente circostante, la temperatura media radiante è piuttosto un indicatore del comfort termico, e proprio per questo diventa un parametro chiave nella valutazione dell'isola di calore e della sua incidenza sul benessere degli individui.

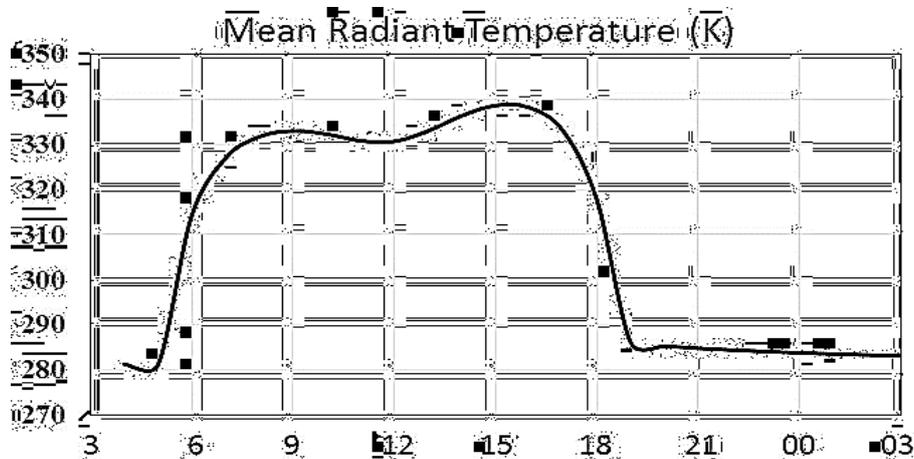


Fig. 52 Andamento timico della TMR durante nelle 24 ore

5.3.5.3 PMV e PPD

Un aspetto fondamentale per la valutazione delle condizioni di benessere per un individuo in un ambiente è la nozione di comfort termico; Come già visto precedentemente, il comfort termico (ASHRAE, 2009), è definito come quello stato psico-fisico in cui l'individuo esprime soddisfazione riguardo al microclima ambientale, ovvero non avverte sensazione né di caldo né di freddo. Questa condizione è detta anche di neutralità termica (ASHRAE, 2009). Tale definizione lascia aperto ovviamente un dibattito su ciò che si indichi con "stato psico-fisico" o "soddisfazione", ma essa correttamente enfatizza che il giudizio di comfort è una valutazione soggettiva che coinvolge fattori influenzati da processi fisici, fisiologici e psicologici differenti da persona a persona. In generale comunque la sensazione di comfort si percepisce quando la temperatura del corpo viene mantenuta entro un certo range abbastanza stretto, l'umidità della pelle è bassa e lo sforzo di termoregolazione del corpo è minimizzato. I forti connotati soggettivi del comfort emergono invece dai comportamenti che consciamente o inconsciamente un individuo tiene e che sono guidati dalle sensazioni termiche e di umidità percepite in un certo ambiente; alcuni di questi comuni atteggiamenti sono il cambio di vestiario o di attività, lo spostamento da un certo luogo, la correzione della postura, la variazione dei parametri del sistema di condizionamento, l'apertura di una finestra, o addirittura anche le stesse lamenti. Per stimare il comfort termico e integrare tra loro i differenti parametri responsabili delle condizioni di benessere termico, sono stati sviluppati nel corso degli anni diversi indici, tra cui il Predicted Mean Vote o PMV. Il PMV o Predicted Mean Vote assume la definizione di indice che predice il giudizio medio di un grande gruppo di persone sulla scala di sensazione termica ASHRAE, che va da -3 (molto freddo), a +3 (molto caldo) (ASHRAE, 2009). Essendo un indice medio riferito ad un gruppo di individui, occorre notare che le condizioni termiche ottimali all'interno del gruppo possono probabilmente variare tra i soggetti anche fino ad una unità della scala ASHRAE (Humphreys M.A. e Nicol J. F., 2002, p.563). Perciò, anche se i valori termici in un certo locale sono regolati secondo il modello del PMV, il raggiungimento di un PMV pari a zero non annulla completamente la percentuale di persone insoddisfatte ma la minimizza al 5%. In secondo luogo, è importante ricordare che il modello del PMV si basa su una misura di come gli occupanti sentano il freddo o il caldo: concettualmente infatti, la sensazione termica è differente dalle misure di soddisfazione termica, di accettabilità termica, di comfort termico e di preferenza termica. Mentre la sensazione di per sé valuta semplicemente la temperatura che gli occupanti

percepiscono, le altre misure implicano che gli occupanti esprimano un parere sul grado di adeguatezza di quella temperatura. Per tale ragione la comunità assume come giudizio di comfort termico non solo il valore di PMV pari a zero, ma l'intero range compreso tra -1 e +1 (J.F.). Capita infine che il valore del PMV, normalmente compreso tra -3 e +3, raggiunga valori ben sopra o al di sotto degli estremi di questo range, dal momento che è calcolato a partire da un bilancio energetico dai connotati fortemente soggettivi. Un'altra grande differenza tra altri indici di comfort e il PMV è il livello di dettaglio usato per calcolare il bilancio di energia del corpo umano: tutti questi indici biometeorologici presuppongono che la persona per la quale viene calcolato l'indice si trovi in piedi in un ambiente in cui il suo corpo si sia adattato alle condizioni atmosferiche circostanti. In un ambiente urbano però quest'ipotesi è spesso imprecisa dal momento che le condizioni atmosferiche microclimatiche – in particolare vento e temperatura radiante – possono variare drasticamente anche nel giro di pochi metri, per la presenza di un muro che protegge dal vento o per la presenza di un edificio che genera ombra e che diminuisce il fattore di vista del cielo (al., 2012). Ebbene il PMV considera questa condizione, e ciò lo rende uno degli indici più favorevoli per il calcolo del benessere termico. ENVI-met è in grado di eseguire questo bilancio e stabilire statisticamente il valore del PMV di una persona presente all'interno del modello simulato. Gli estremi considerati da Envi-met per il calcolo del PMV sono -4 e +4. È importante notare anche come il modello del PMV utilizzato da ENVI-met sia uno speciale adattamento al clima degli ambienti esterni del modello originale di Fanger, inizialmente destinato a valutare le sole condizioni in un ambiente chiuso: il merito di questa rielaborazione è assegnato a Jendritzky e a Nübler che nel 1981 aggiunsero delle complesse equazioni di bilancio energetico riferite all'ambiente alla preesistente struttura di Fanger, dando vita al modello chiamato "Klima-Michel-Model", noto con la sigla KMM. Come già illustrato nei precedenti capitoli, dopo aver definito il PMV, Fanger sviluppa anche un ulteriore indice, strettamente legato al primo, il PPD (Predicted Percentage of Dissatisfied): esso misura la percentuale di persone insoddisfatte delle condizioni ambientali in cui si trovano. Indici come il PMV e il PPD sono molto diffusi per la stima dell'indoor thermal comfort, ma il loro utilizzo sull'ambiente esterno spezza in due la comunità scientifica (Honjo T. 2009, pp. 43-47). Molti ricercatori, come per esempio de Dear R. e Spagnolo J. (2003, pp.721-738) hanno recensito degli studi sul benessere termico in ambienti aperti e si sono chiesti se la teoria sviluppata per gli ambienti chiusi possa essere applicata a quelli esterni senza alcuna modifica. Come molti altri colleghi, essi hanno notato che per il comfort outdoor occorre preferire l'utilizzo di indici alternativi a quelli del PMV e del PPD, dal

momento che l'intervento per trasformare il Predicted Mean Vote da un indice di comfort indoor ad uno per quello outdoor compiuta da Jendritzky G. e Nübler W. non è ancora ampiamente accettata. Inoltre, per parte della comunità scientifica, il PMV non dovrebbe essere utilizzato per altri due motivi: il primo è che l'EN ISO 7730, norma emanata dall'ISO (International Standard Organization, vale a dire l'organizzazione internazionale che si occupa di elaborare gli standard per tutti i settori della tecnica), lo riconosce come un indice da utilizzare propriamente per gli ambienti interni. Il secondo emerge dalla discrepanza tra il PMV e ASV (Actual Sensation Vote), nel caso di valutazioni sul microclima all'esterno degli edifici, dimostrata in numerosi studi (Baker N. et al. 2001, pp. 227–235; Thorsson et al. 2004, pp.149-156; JuYoun Kwon e Parsons K. 2009, p.5): l'ASV rappresenta l'effettiva risposta di un gruppo di individui sul comfort termico in un certo ambiente raccolta attraverso delle interviste; i risultati in tal caso mostrano spesso come, per oltre il 50% degli intervistati, il valore di comfort predetto dal PMV sovrastimi quello espresso dai soggetti intervistati. In quanto a indici alternativi per la valutazione del comfort outdoor, molto diffusi sono la PET (Physiological Equivalent Temperature) e l'UTCI (Universal Thermal Climate Index). La PET, introdotta da Höppe nel 1999 - "The physiological equivalent temperature - a universal index for the biometeorological assessment of the thermal environment" -, è preferita ad altri indici (per esempio il PMV) per il fatto che essa è espressa in °C, il che rende i risultati molto più comprensibili e immediati per coloro che non sono molto pratici con la terminologia della moderna biometereologia (Iziomon M.G. et al. 1999, p.76). L'Universal Thermal Climate Index invece si sta affermando con grande rapidità in gran parte della comunità scientifica dal momento che si basa su una serie di conoscenze molto approfondite della termo-fisiologia e della teoria dello scambio di calore provenienti da recentissime scoperte, addirittura anche nel campo della medicina. Questo tipo di indice è stato sviluppato dalla Commissione 6, scelta appositamente dall'ISB per unificare tutto il bagaglio di nozioni note fino ad ora, e proprio per questo motivo sta riscuotendo un notevole successo negli studi sul benessere termico per ambienti esterni.

5.3.6 Leonardo

L'ultima sezione di ENVI-met è quella adibita alla lettura dei files di output. Per fare ciò si è scelto di utilizzare Leonardo in modo da avere una lettura grafica del dato.

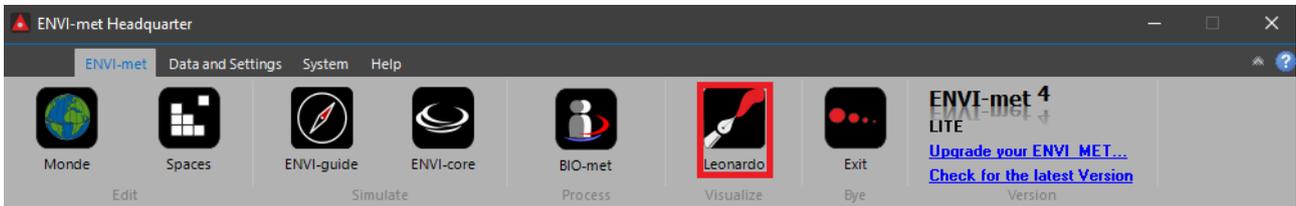


Fig. 53 Leonardo

L'interfaccia è composta da tre suddivisioni:

- DataNavigator, carica il file di output e permette di selezionare gli indicatori di nostro interesse;
- La mappa, la vera e propria area di visualizzazione degli indicatori;
- I settaggi delle tavole, una sezione adibita alle modifiche grafiche delle tavole in modo da aver una lettura quanto più pulita degli indicatori.

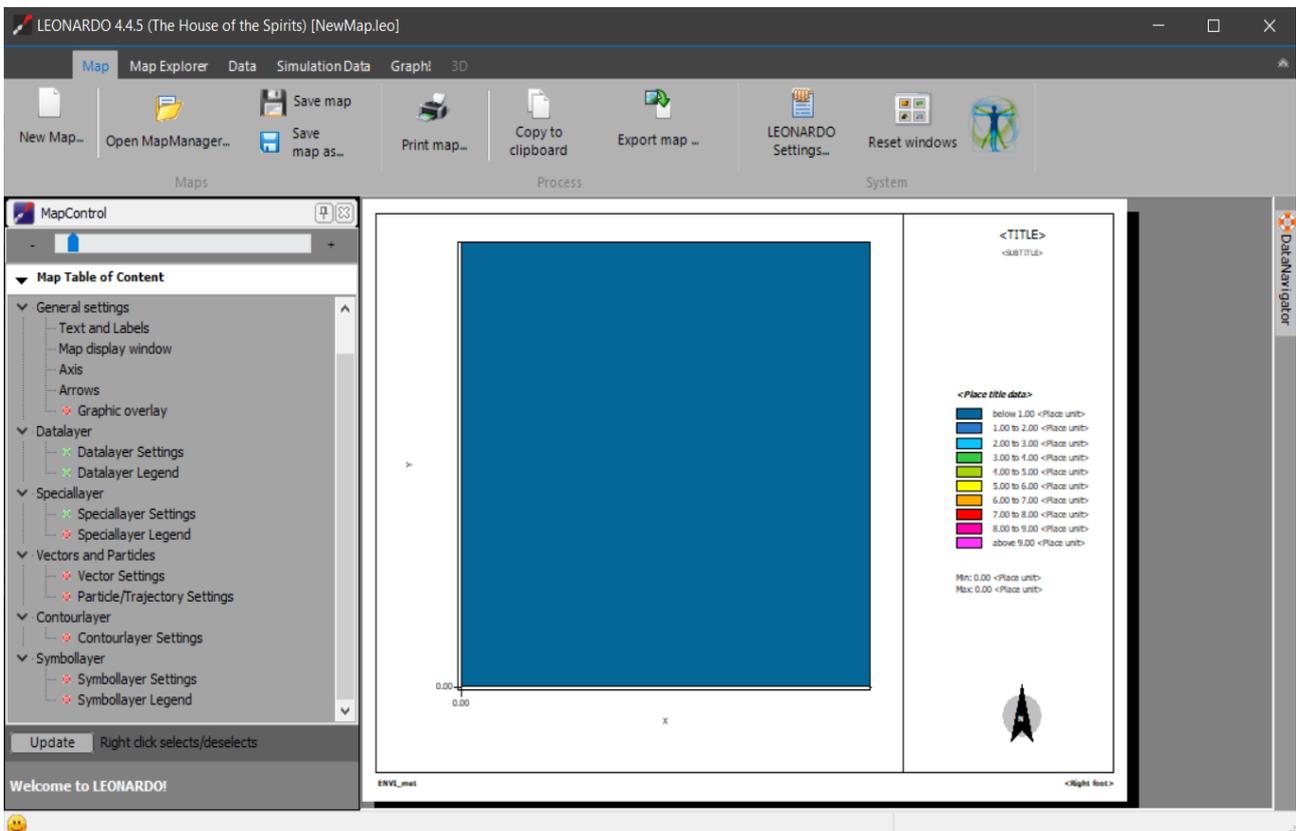


Fig. 54 Leonardo, aspetto all'apertura della sezione

5.4 Gli scenari di simulazione

Per ciascuna delle due aree di studio sono stati simulati 2 scenari:

- Lo Stato dell'arte ovvero la condizione attuale prima della riabilitazione climatica;
- L'intervento riabilitativo, lo scenario in cui è stata utilizzata la tecnica dello Slurry, andando di fatto a sostituire il conglomerato bituminoso convenzionale con una pavimentazione fredda. Per le caratteristiche dei materiali dello stato dell'arte e del successivo intervento riabilitativo rifarsi ai valori indicati nei capitoli precedenti così come viene di fatto trascurata la degradazione ottica dei materiali, il cui risultato è la diminuzione di albedo nel tempo, poiché come anticipato all'applicazione riabilitativa verrà affiancata una corretta manutenzione della pavimentazione attraverso l'uso di lavaggio con solvente. Per quanto concerne l'area aeroportuale, oltre all'intervento sulla pavimentazione si è scelto di applicare una vernice bianca al tetto del terminal.

Per valutare i risultati sono stati come indicatori di benessere termoigrometrico la temperatura dell'aria, la temperatura media radiante delle superfici, il PMV e il PPD alla quota di 1.5 m dal suolo, alle ore 12:00 e alle ore 18:00.

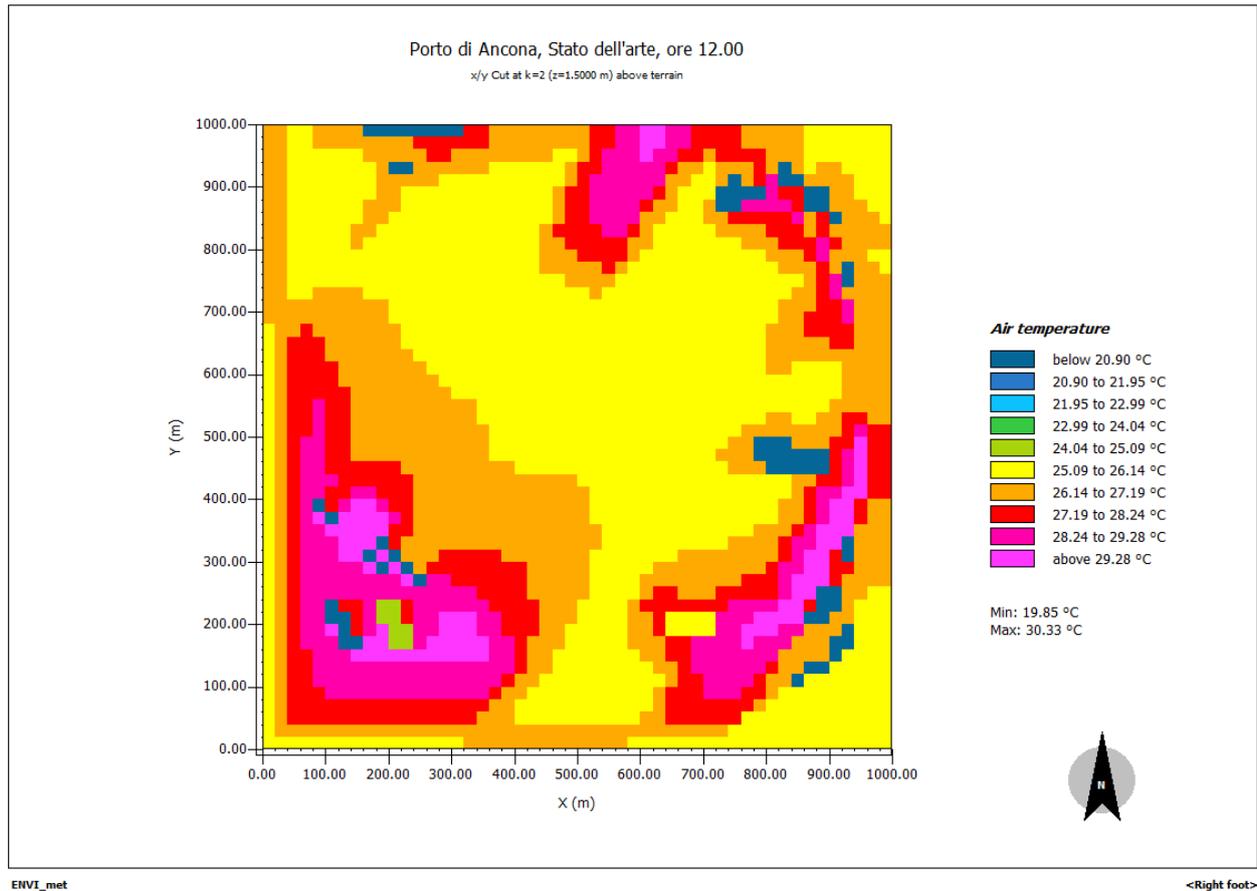


Fig. 55 Porto di Ancona, stato dell'arte, ore 12, TEMPERATURA DELL'ARIA

La tavola presenta una sezione visibile, alla quota di 1.5 m dal terreno e alle ore 12, della temperatura dell'aria relativa lo stato dell'arte del porto di Ancona. La simulazione fornisce rispettivamente la minima e la massima (da 19.85°C a 30.33°C) temperatura dell'aria riguardante l'intera area. Dalla legenda si nota come le porzioni interessate dal conglomerato bituminoso convenzionale, strade e parcheggi, tocchino le tonalità dal rosso al viola, andando di fatto a costituire le porzioni più calde della mappa.

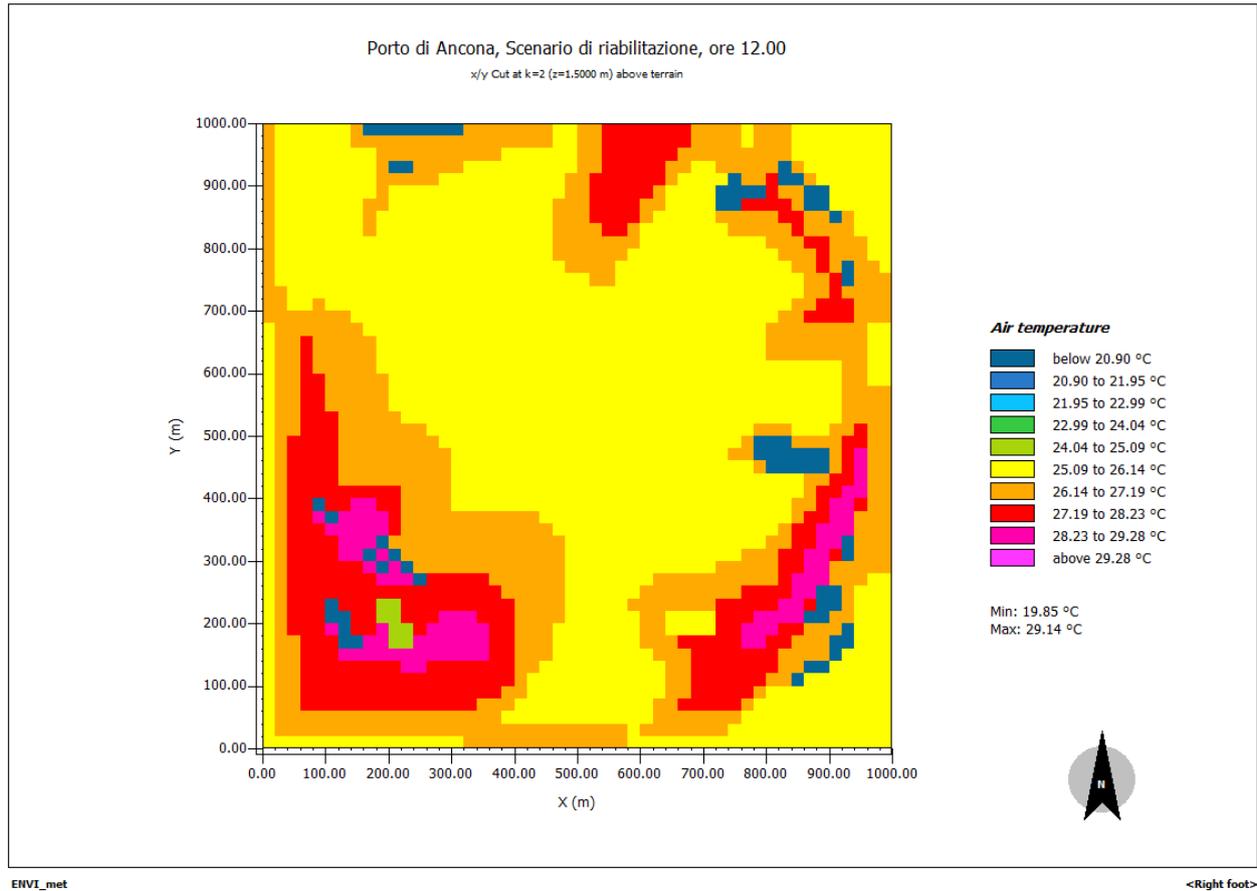


Fig. 56 Porto di Ancona, scenario di riabilitazione, ore 12, TEMPERATURA DELL'ARIA

La tavola presenta una sezione visibile, alla quota di 1.5 m dal terreno e alle ore 12, della temperatura dell'aria relativa lo scenario di riabilitazione del porto di Ancona. La simulazione fornisce rispettivamente la minima e la massima (da 19.85°C a 29.14°C) temperatura dell'aria riguardante l'intera area, facendo di fatto notare una diminuzione della massima di 1.5°C rispetto lo stato dell'arte. Inoltre, dalla legenda si nota come le porzioni interessate dalla pavimentazione fredda, ovvero strade e parcheggi, siano più fredde, cambiando di fatto le proprie tonalità rispettivamente dal viola al rosso e dal rosso all'arancione rispetto allo stato dell'arte.

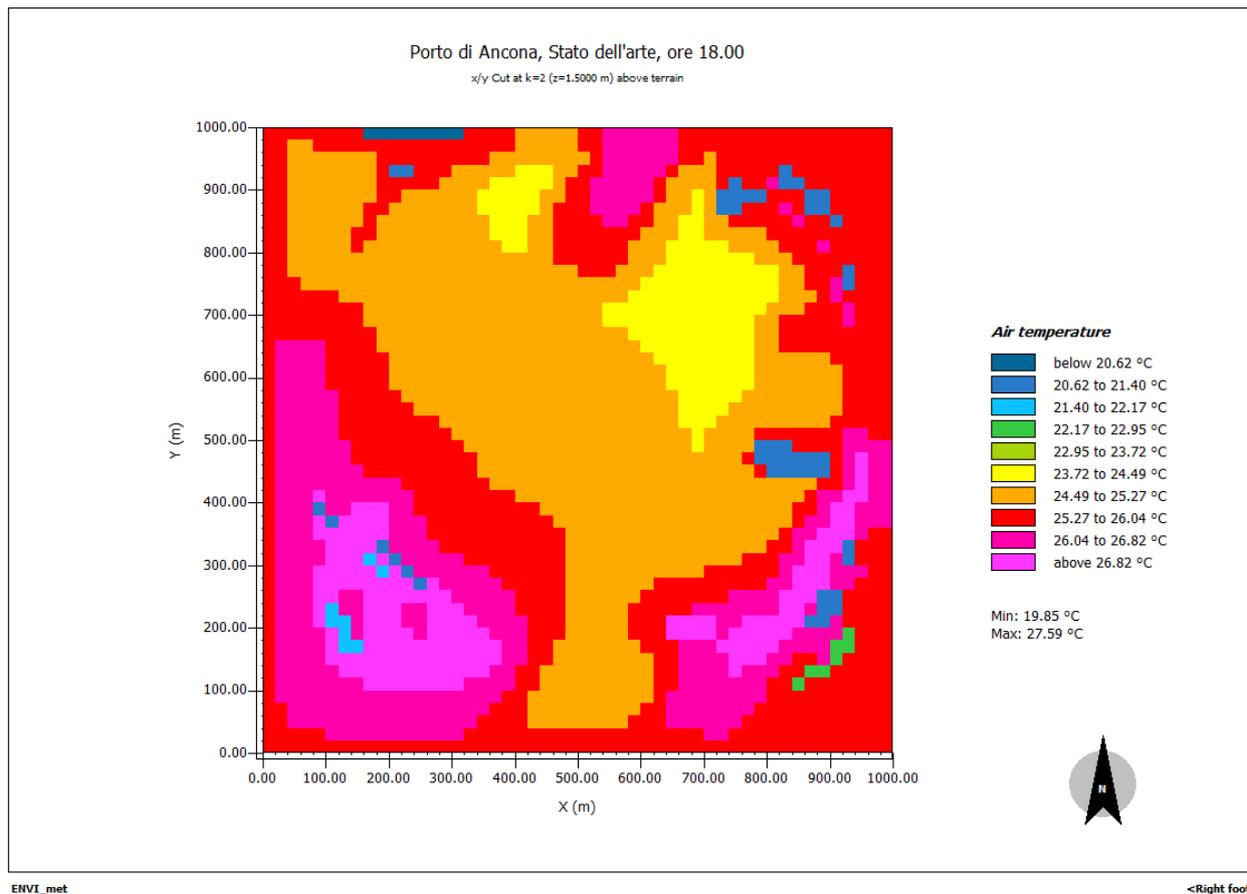


Fig. 57 Porto di Ancona, stato dell'arte, ore 18, TEMPERATURA DELL'ARIA

La tavola presenta una sezione visibile, alla quota di 1.5 m dal terreno e alle ore 18, della temperatura dell'aria relativa lo stato dell'arte del porto di Ancona. La simulazione fornisce rispettivamente la minima e la massima (da 19.85°C a 27.59°C) temperatura dell'aria riguardante l'intera area. Dalla legenda si nota come le porzioni interessate dal conglomerato bituminoso convenzionale, strade e parcheggi, tocchino le tonalità dal rosso al viola, andando di fatto a costituire le porzioni più calde della mappa.

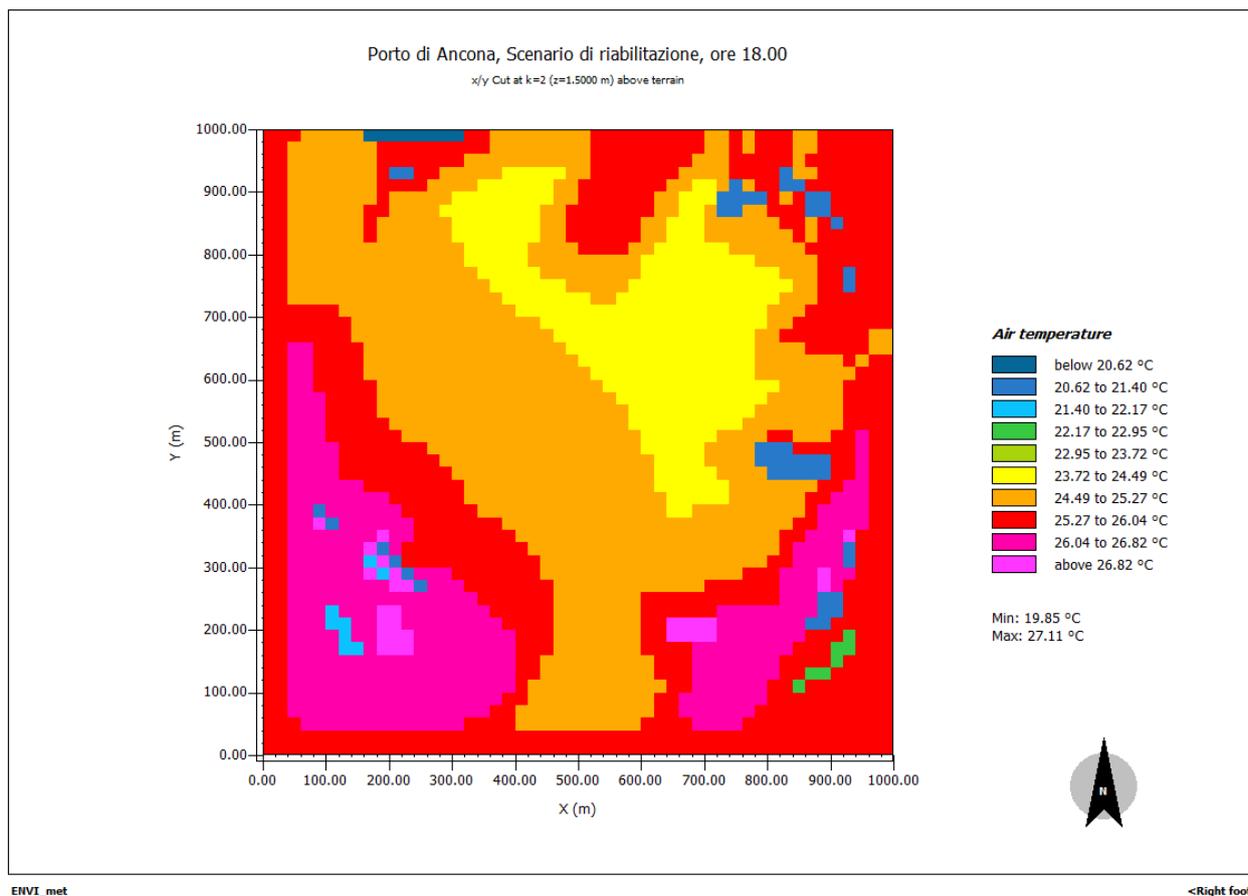


Fig. 58 Porto di Ancona, scenario di riabilitazione, ore 18, TEMPERATURA DELL'ARIA

La tavola presenta una sezione visibile, alla quota di 1.5 m dal terreno e alle ore 18, della temperatura dell'aria relativa lo scenario di riabilitazione del porto di Ancona. La simulazione fornisce rispettivamente la minima e la massima (da 19.85°C a 27.11°C) temperatura dell'aria riguardante l'intera area, facendo notare una diminuzione della massima di 0.5°C rispetto lo stato dell'arte, una variazione minima ma del tutto compatibile con la realtà per via dell'orario. Inoltre, dalla legenda si nota come le porzioni interessate dalla pavimentazione fredda, ovvero strade e parcheggi, siano più fredde, cambiando di fatto le proprie tonalità rispettivamente dal viola al rosso e dal rosso all'arancione rispetto allo stato dell'arte.

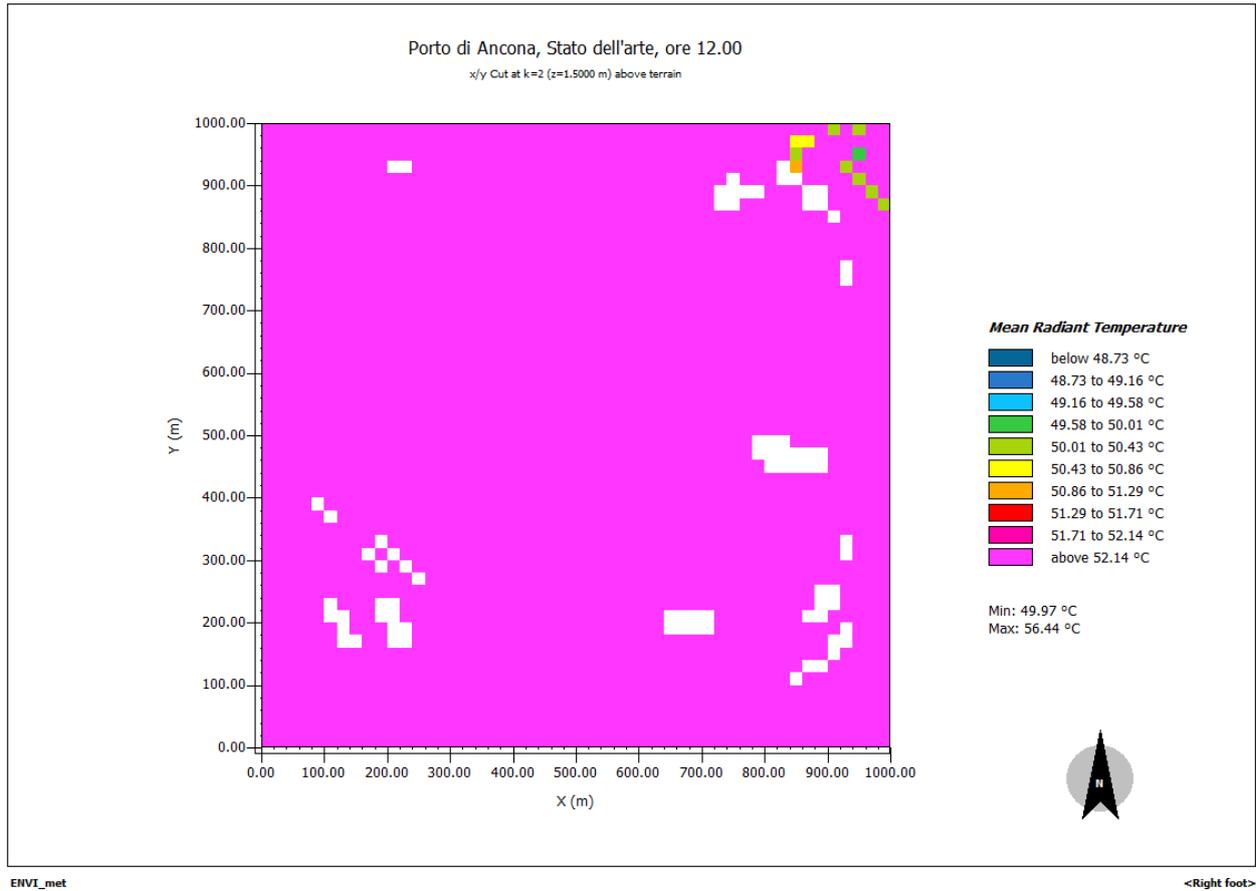


Fig. 59 Porto di Ancona, stato dell'arte, ore 12, TEMPERATURA MEDIA RADIANTE

La tavola presenta una sezione visibile, alla quota di 1.5 m dal terreno e alle ore 12, della temperatura media radiante relativa lo stato dell'arte del porto di Ancona. La simulazione fornisce rispettivamente la minima e la massima (da 49.97°C a 56.44°C) temperatura media radiante riguardante l'intera area. Dalla legenda si nota come la mappa nella sua totalità tocchi le tonalità del viola.

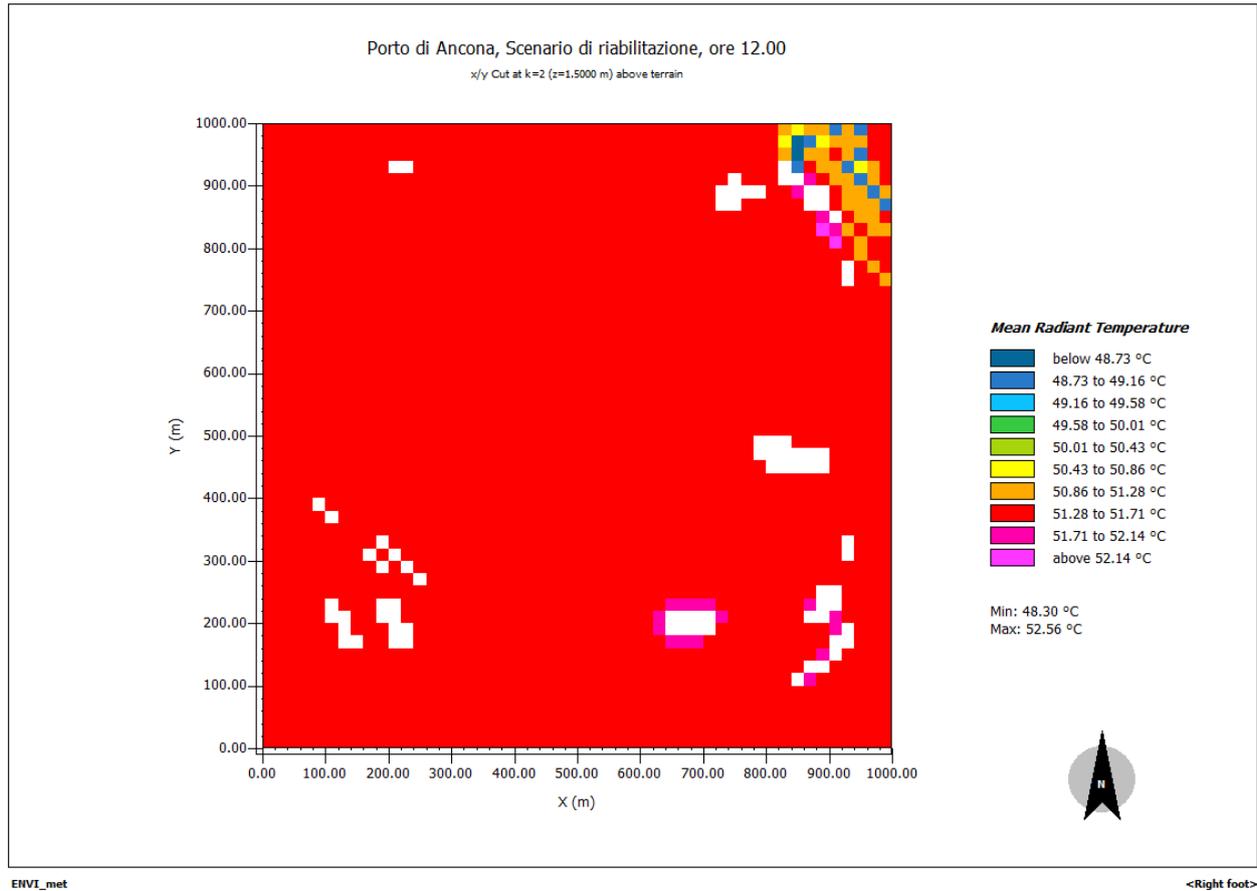


Fig. 60 Porto di Ancona, scenario di riabilitazione, ore 12, TEMPERATURA MEDIA RADIANTE

La tavola presenta una sezione visibile, alla quota di 1.5 m dal terreno e alle ore 12, della temperatura media radiante relativa lo scenario di riabilitazione del porto di Ancona. La simulazione fornisce rispettivamente la minima e la massima (da 48.30 °C a 52.56°C) temperatura media radiante riguardante l'intera area, facendo registrare una netta diminuzione di 4°C rispetto la massima dello stato dell'arte. Dalla legenda si nota come la mappa nella sua totalità tocchi questa volta le tonalità del rosso.

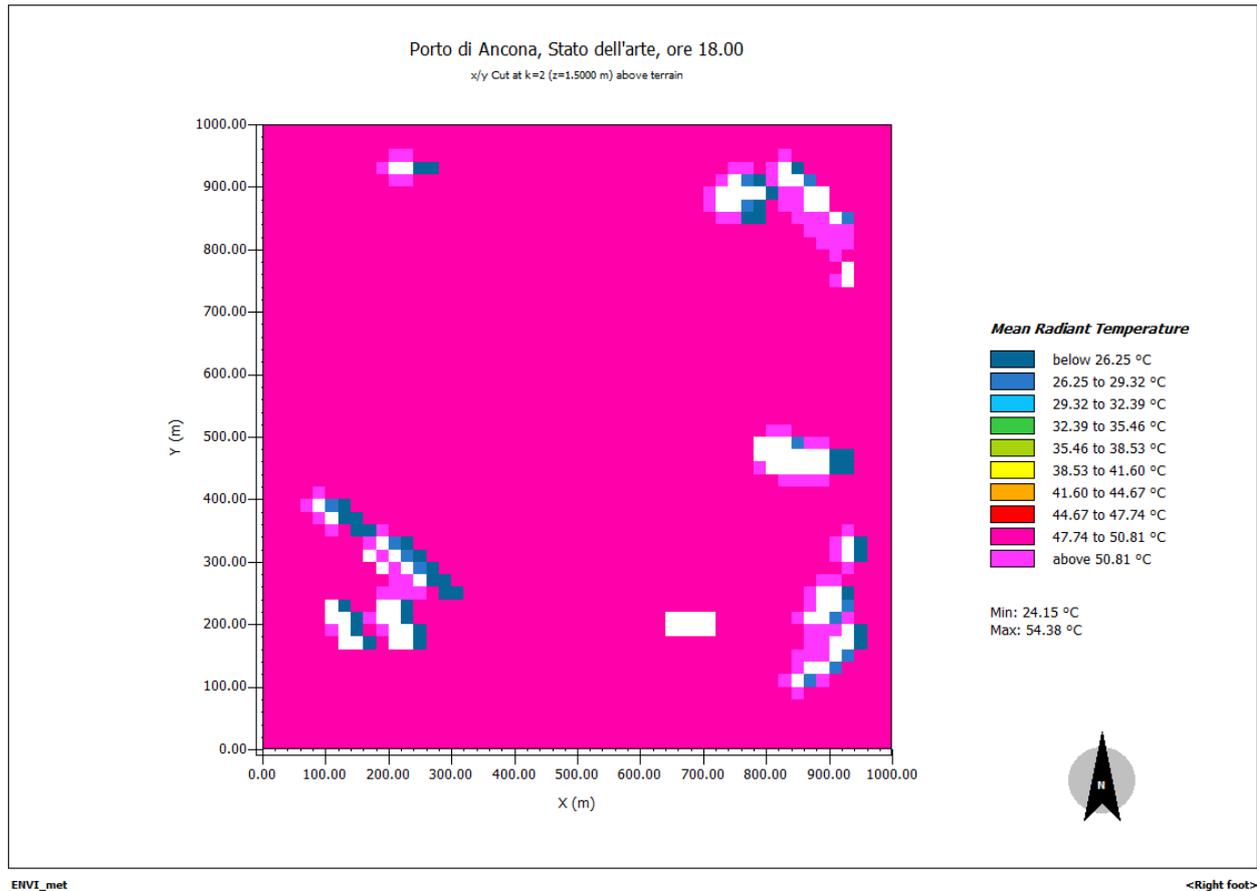


Fig. 61 Porto di Ancona, stato dell'arte, ore 18, TEMPERATURA MEDIA RADIANTE

La tavola presenta una sezione visibile, alla quota di 1.5 m dal terreno e alle ore 18, della temperatura media radiante relativa lo stato dell'arte del porto di Ancona. La simulazione fornisce rispettivamente la minima e la massima (da 24.15 °C a 54.38°C) temperatura media radiante riguardante l'intera area. Dalla legenda si nota come la mappa nella sua totalità tocchi le tonalità del viola.

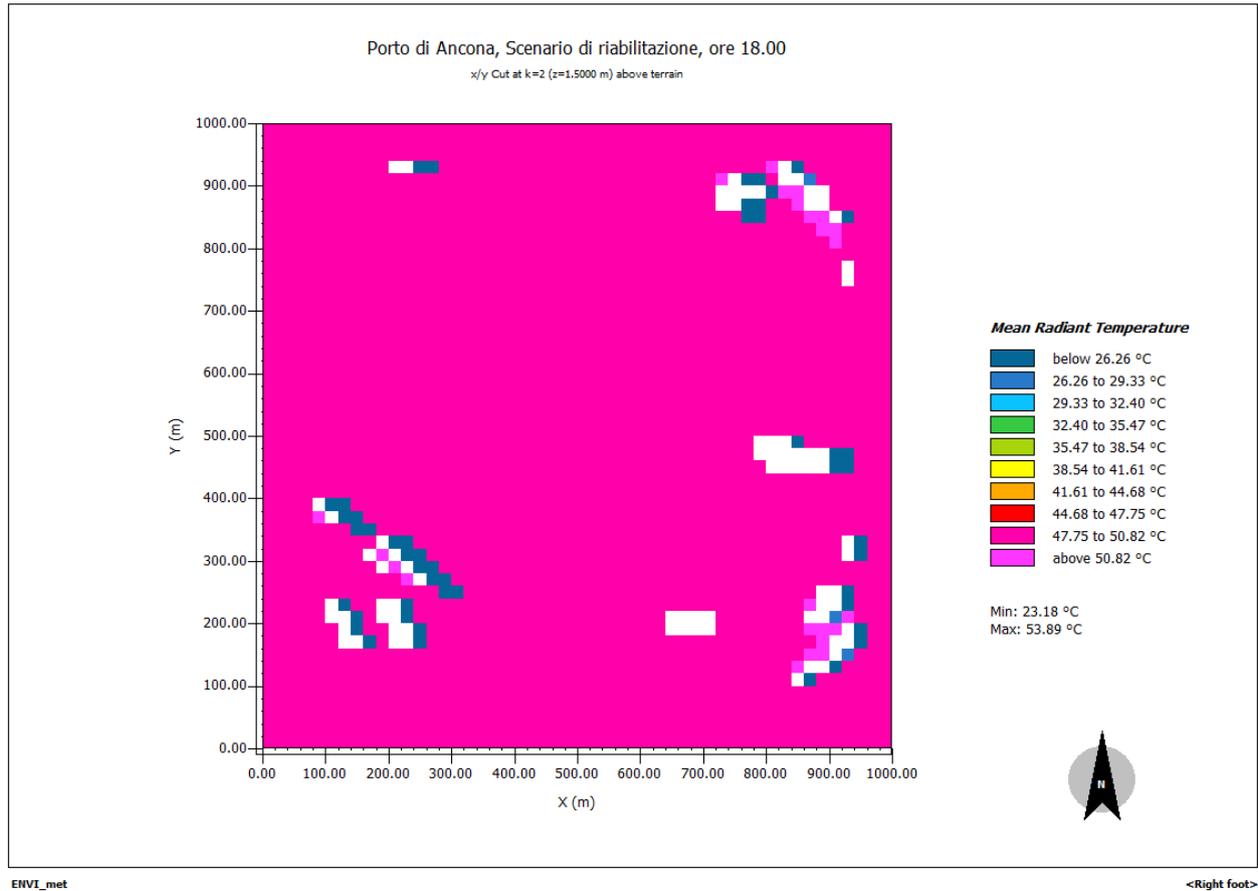


Fig. 62 Porto di Ancona, scenario di riabilitazione, ore 18, TEMPERATURA MEDIA RADIANTE

La tavola presenta una sezione visibile, alla quota di 1.5 m dal terreno e alle ore 18, della temperatura media radiante relativa lo scenario di riabilitazione del porto di Ancona. La simulazione fornisce rispettivamente la minima e la massima (da 23.18 °C a 53.89°C) temperatura media radiante riguardante l'intera area, facendo registrare una variazione minima rispetto lo stato dell'arte ma compatibile per l'orario della giornata. Dalla legenda si nota come la mappa nella sua totalità tocchi questa volta le tonalità del viola.

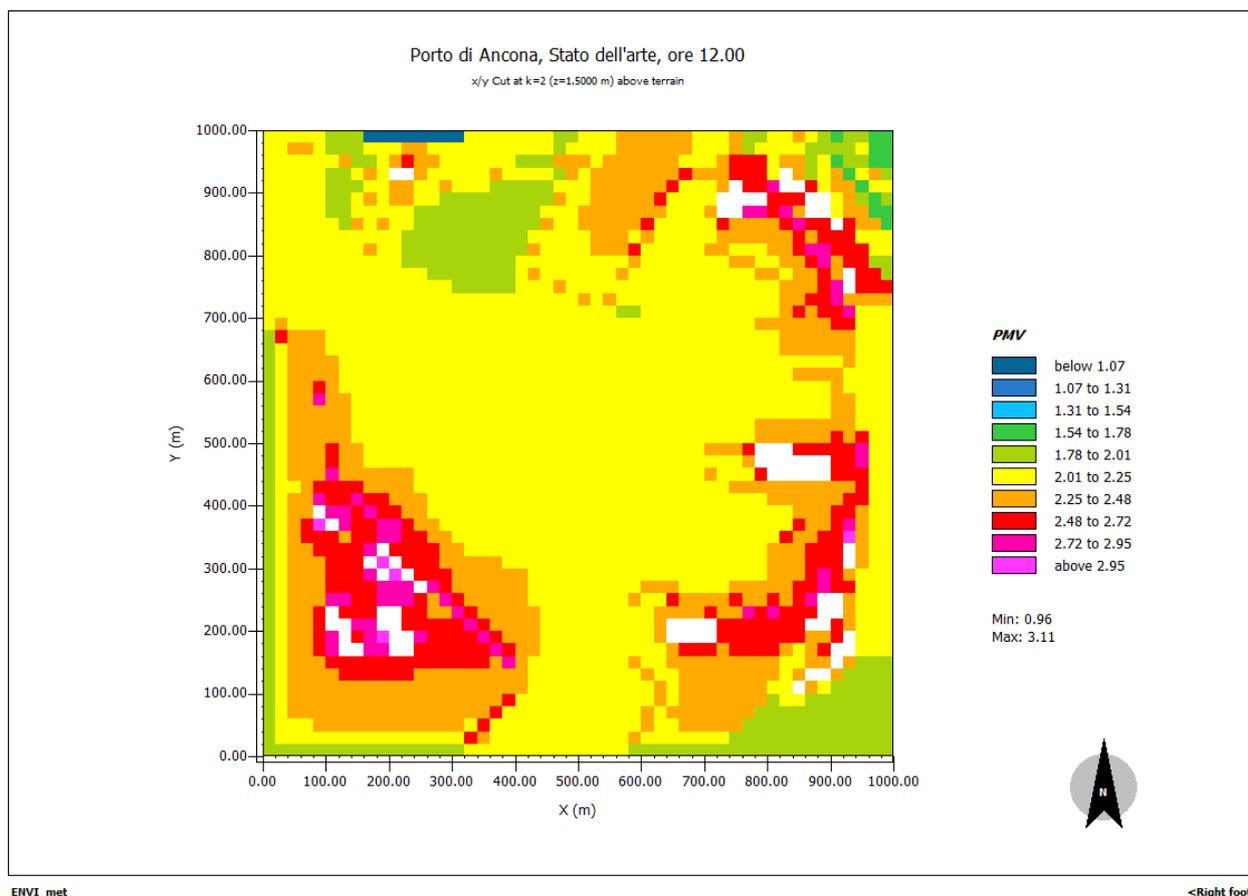


Fig. 63 Porto di Ancona, stato dell'arte, ore 12, PMV

La tavola presenta una sezione visibile, alla quota di 1.5 m dal terreno e alle ore 12, del PMV relativa lo stato dell'arte del porto di Ancona. La simulazione fornisce rispettivamente il valore minimo e massimo (da 0.96 a 3.11) riguardante l'intera area. Dalla legenda si nota come le porzioni interessate dal conglomerato bituminoso convenzionale, strade e parcheggi, abbiano PMV da 2.10 a 2.95, risultando di fatto molto calde per l'uomo.

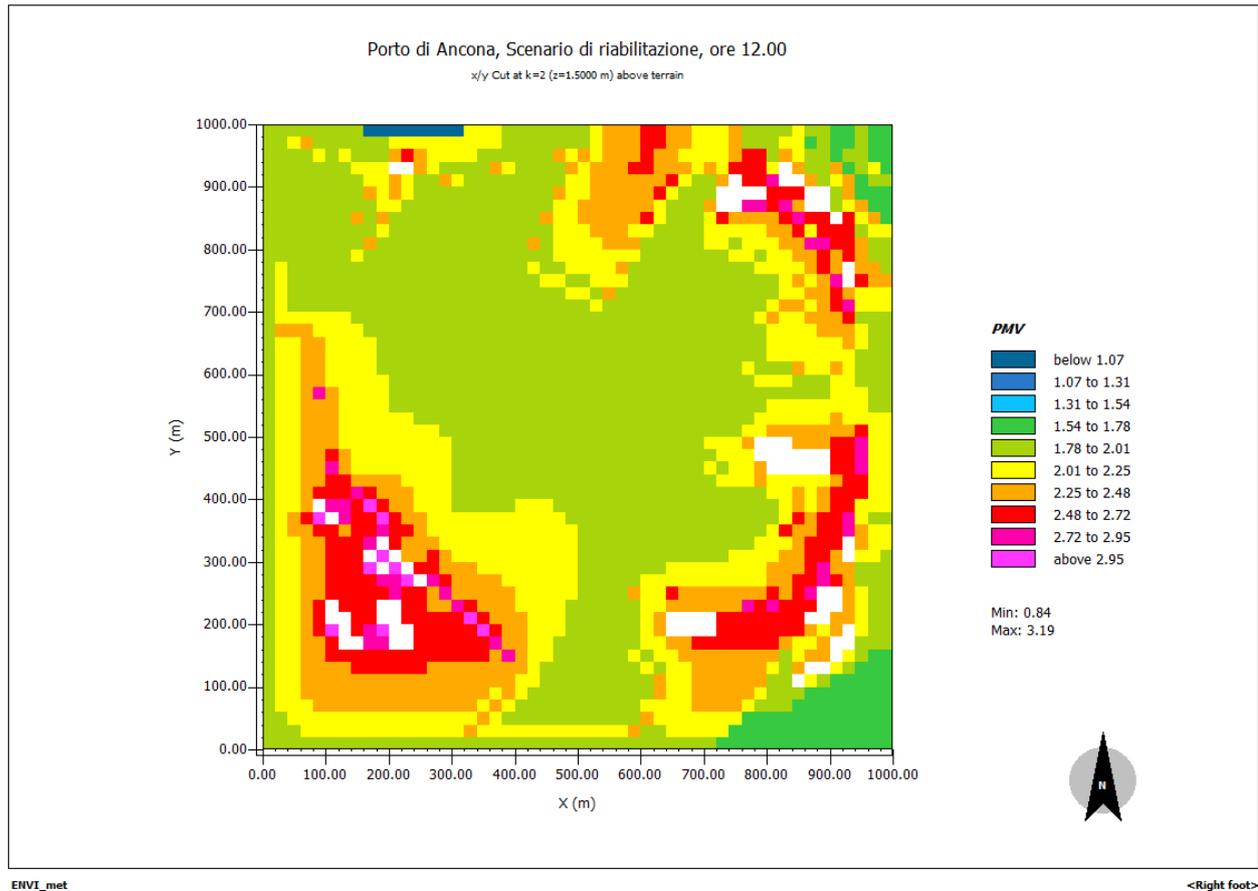


Fig. 64 Porto di Ancona, scenario di riabilitazione, ore 12, PMV

La tavola presenta una sezione visibile, alla quota di 1.5 m dal terreno e alle ore 12, del PMV relativa lo scenario di riabilitazione del porto di Ancona. La simulazione fornisce rispettivamente il valore minimo e massimo (da 0.84 a 3.19) riguardante l'intera area. Dalla legenda si nota come le porzioni interessate dalla pavimentazione fredda, ovvero strade e parcheggi, abbiano ridotto di una scala di colore il valore di PMV, risultando di fatto migliori rispetto lo stato dell'arte, ma comunque calde per l'uomo.

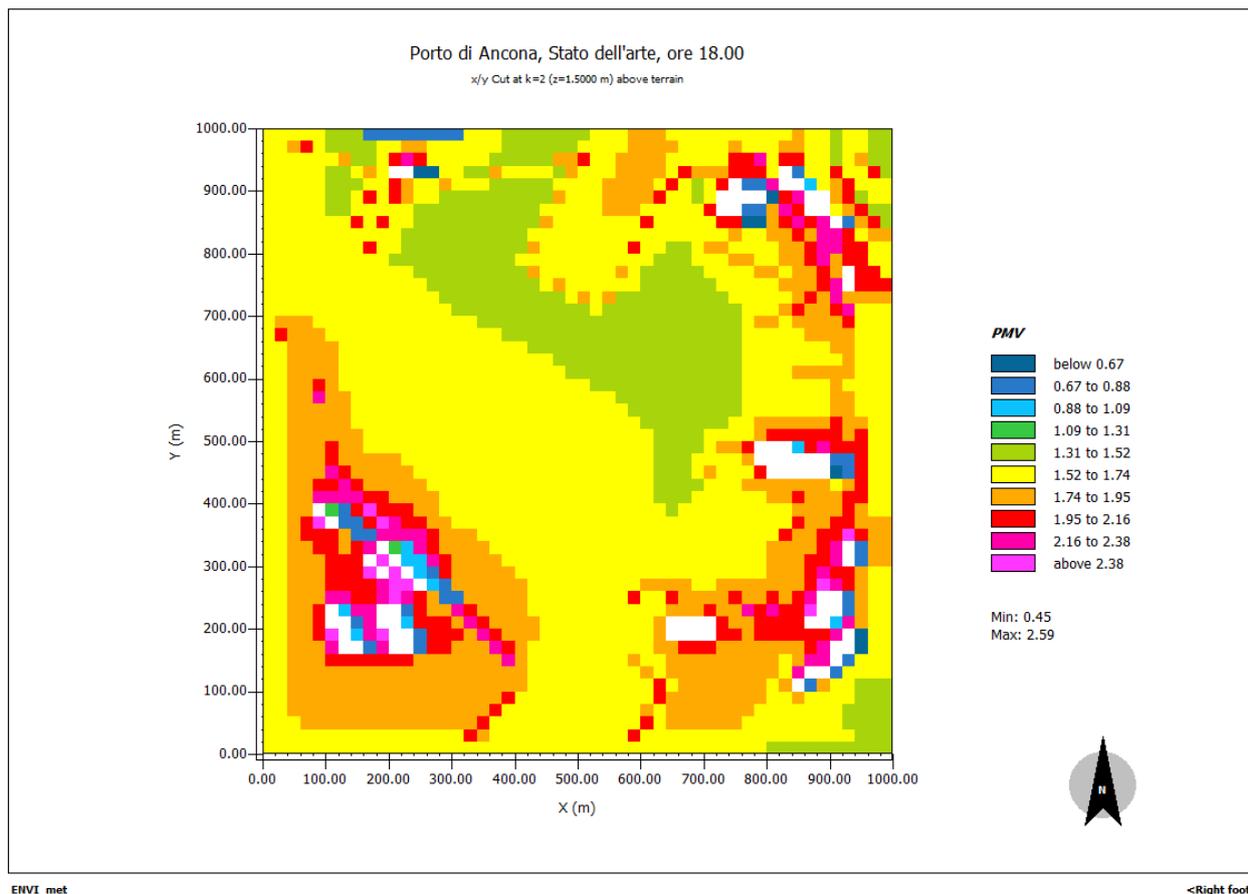


Fig. 65 Porto di Ancona, stato dell'arte, ore 18, PMV

La tavola presenta una sezione visibile, alla quota di 1.5 m dal terreno e alle ore 18, del PMV relativa lo stato dell'arte del porto di Ancona. La simulazione fornisce rispettivamente il valore minimo e massimo (da 0.45 a 2.59) riguardante l'intera area. Dalla legenda si nota come le porzioni interessate dal conglomerato bituminoso convenzionale, strade e parcheggi, abbiano PMV da 1.52 a 2.59, risultando di fatto calde per l'uomo.

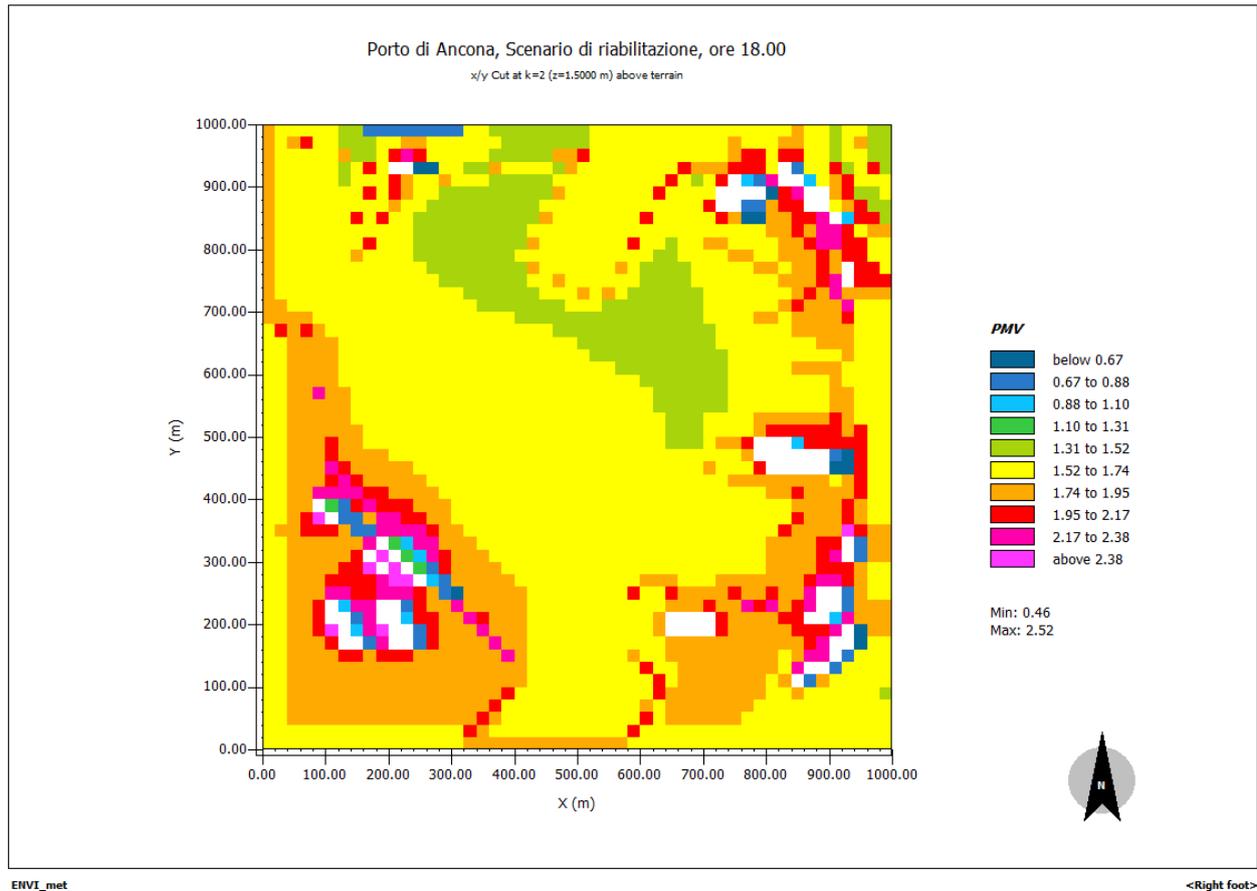


Fig. 66 Porto di Ancona, scenario di riabilitazione, ore 18, PMV

La tavola presenta una sezione visibile, alla quota di 1.5 m dal terreno e alle ore 18, del PMV relativa lo scenario di riabilitazione del porto di Ancona. La simulazione fornisce rispettivamente il valore minimo e massimo (da 0.46 a 2.52) riguardante l'intera area. Dalla legenda si nota come le porzioni interessate dalla pavimentazione fredda, ovvero strade e parcheggi, abbiano ridotto di una scala di colore il valore di PMV, risultando di fatto migliori rispetto lo stato dell'arte, ma comunque calde per l'uomo.

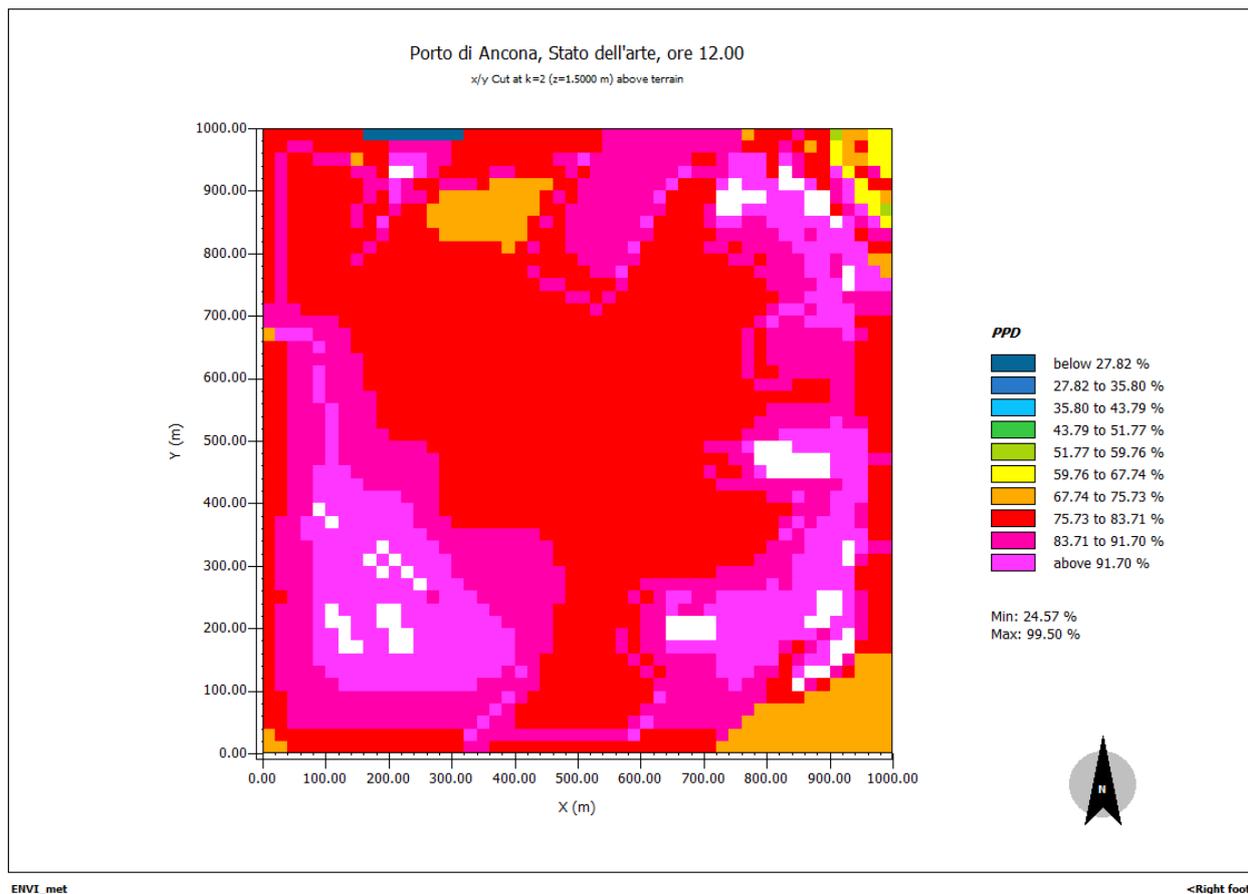


Fig. 67 Porto di Ancona, stato dell'arte, ore 12, PPD

La tavola presenta una sezione visibile, alla quota di 1.5 m dal terreno e alle ore 12, del PPD relativa lo stato dell'arte del porto di Ancona. La simulazione fornisce rispettivamente il valore minimo e massimo (da 27.57% a 99.50%) riguardante l'intera area. Dalla legenda si nota come le porzioni interessate dal conglomerato bituminoso convenzionale, strade e parcheggi, abbiano una percentuale di insoddisfatti superiore al 90%.

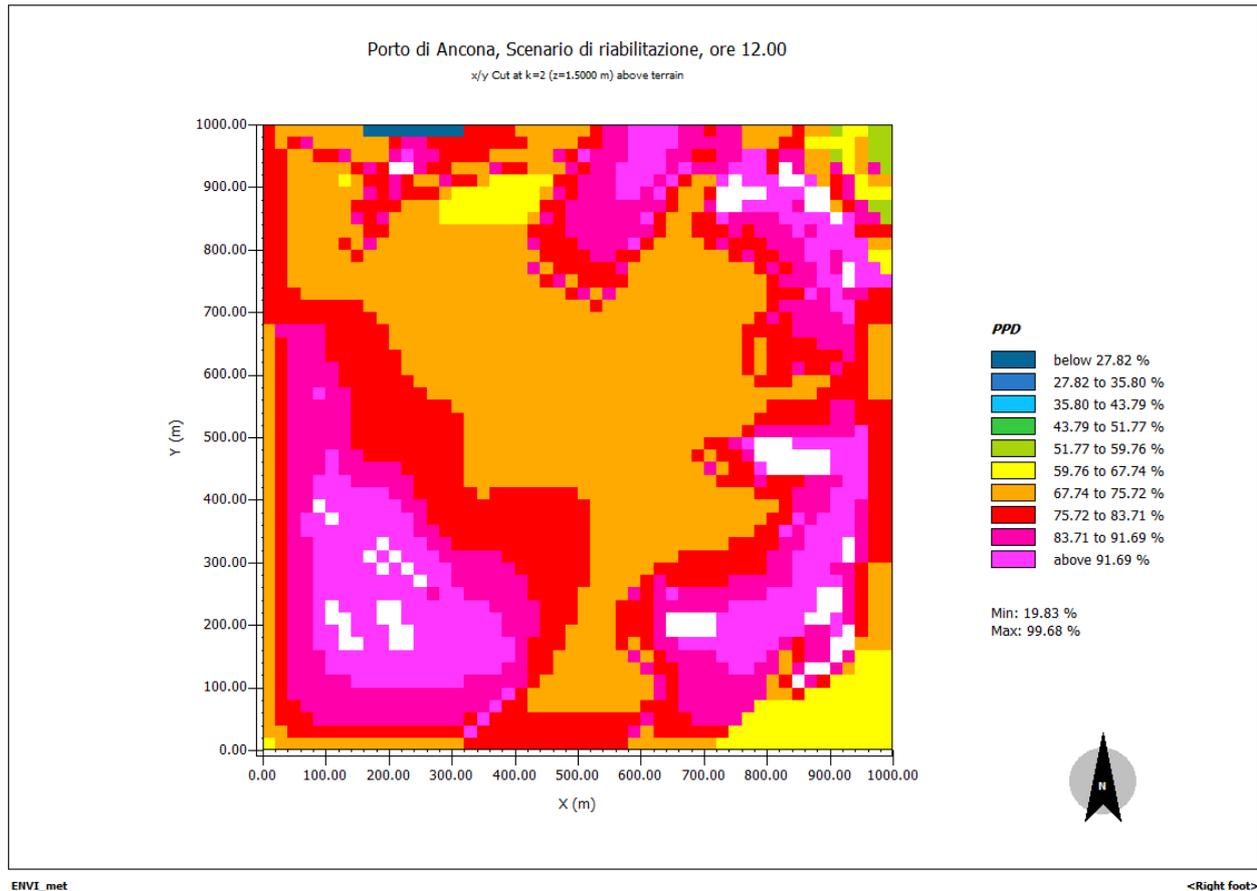


Fig. 68 Porto di Ancona, scenario di riabilitazione, ore 12, PPD

La tavola presenta una sezione visibile, alla quota di 1.5 m dal terreno e alle ore 12, del PPD relativa lo scenario di riabilitazione del porto di Ancona. La simulazione fornisce rispettivamente il valore minimo e massimo (da 19.83% a 99.68%) riguardante l'intera area. Dalla legenda si nota come le porzioni interessate dalla pavimentazione fredda, ovvero strade e parcheggi, abbiano ridotto di una scala di colore il valore di PPD, si è passato infatti ad una percentuale di insoddisfatti di circa il 70%, risultando di fatto migliori rispetto lo stato dell'arte, ma comunque calde per l'uomo.

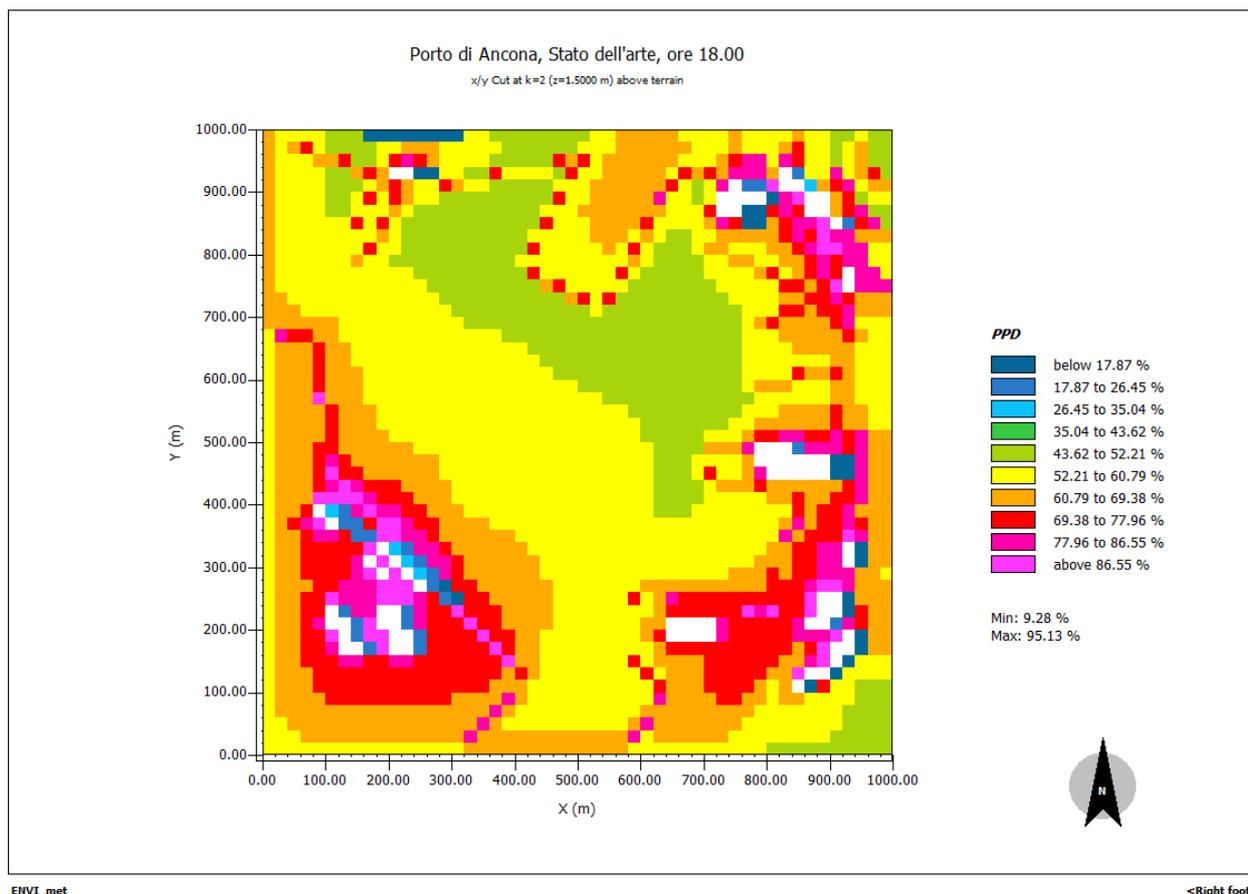


Fig. 69 Porto di Ancona, stato dell'arte, ore 18, PPD

La tavola presenta una sezione visibile, alla quota di 1.5 m dal terreno e alle ore 18, del PPD relativa lo stato dell'arte del porto di Ancona. La simulazione fornisce rispettivamente il valore minimo e massimo (da 9.28% a 95.13%) riguardante l'intera area. Dalla legenda si nota come le porzioni interessate dal conglomerato bituminoso convenzionale, strade e parcheggi, abbiano una percentuale di insoddisfatti tra il 60% e il 70%.

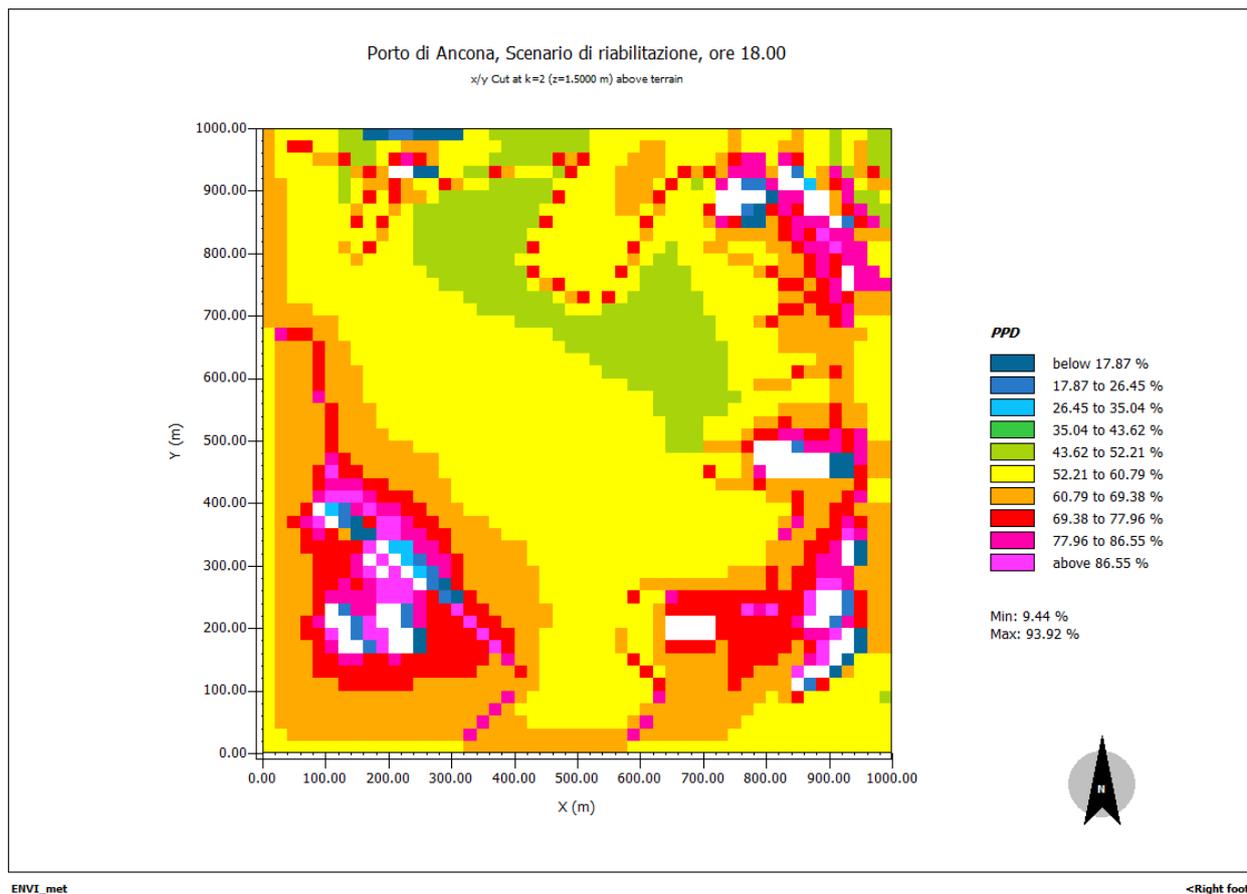


Fig. 70 Porto di Ancona, scenario di riabilitazione, ore 18, PPD

La tavola presenta una sezione visibile, alla quota di 1.5 m dal terreno e alle ore 18, del PPD relativa lo scenario di riabilitazione del porto di Ancona. La simulazione fornisce rispettivamente il valore minimo e massimo (da 9.44% a 93.92%) riguardante l'intera area. Dalla legenda si nota come le porzioni interessate dalla pavimentazione fredda, ovvero strade e parcheggi, abbiano ridotto di una scala di colore il valore di PPD, si è passato infatti ad una percentuale di insoddisfatti compresi fra il 50% ed il 60%, risultando di fatto migliori rispetto lo stato dell'arte, ma comunque calde per l'uomo.

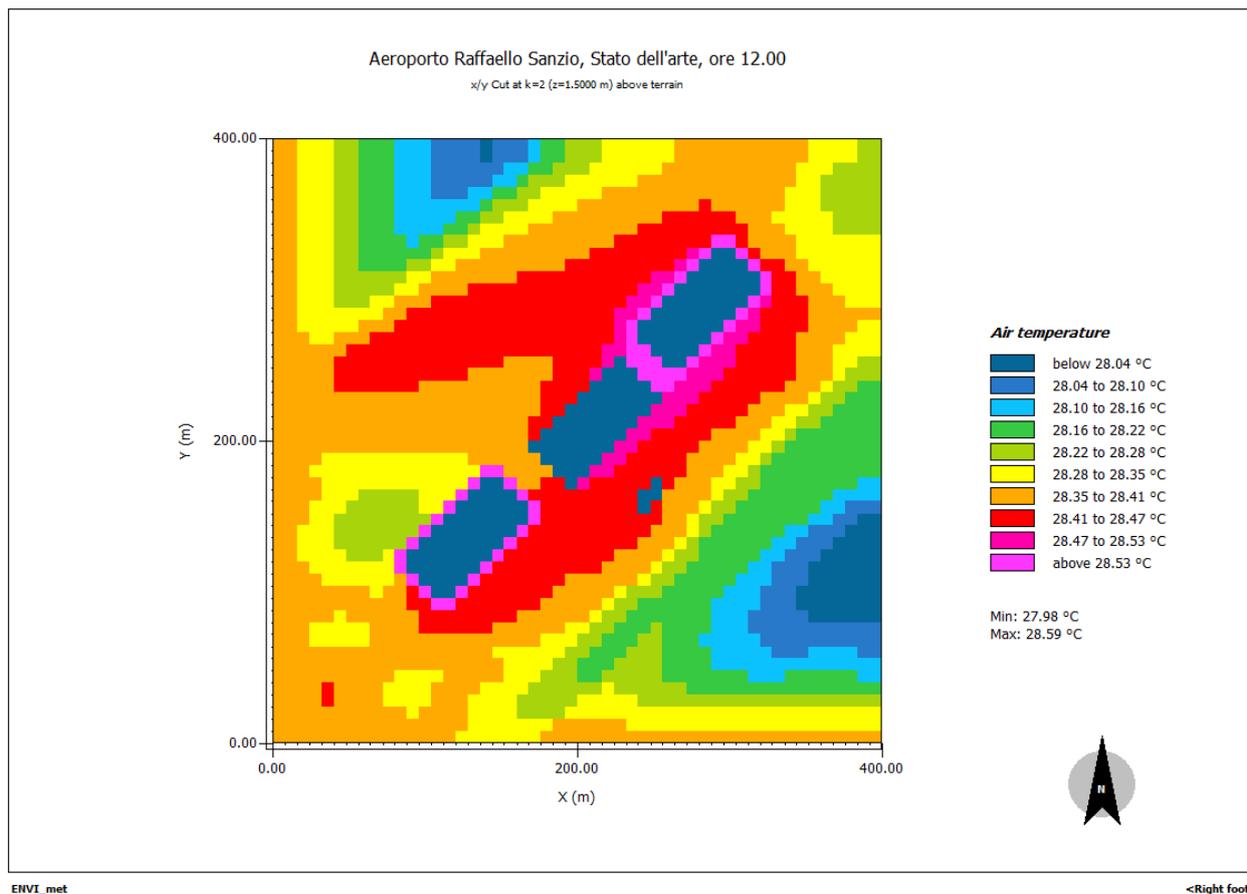


Fig. 71 Aeroporto Raffaello Sanzio, stato dell'arte, ore 12, TEMPERATURA DELL'ARIA

La tavola presenta una sezione visibile, alla quota di 1.5 m dal terreno e alle ore 12, della temperatura dell'aria relativa lo stato dell'arte dell'aeroporto Raffaello Sanzio. La simulazione fornisce rispettivamente la minima e la massima (da 27.98°C a 28.59°C) temperatura dell'aria riguardante l'intera area. Dalla legenda si nota come le porzioni interessate dal conglomerato bituminoso convenzionale, strade e parcheggi, tocchino le tonalità dall'arancione al viola, andando di fatto a costituire le porzioni più calde della mappa.

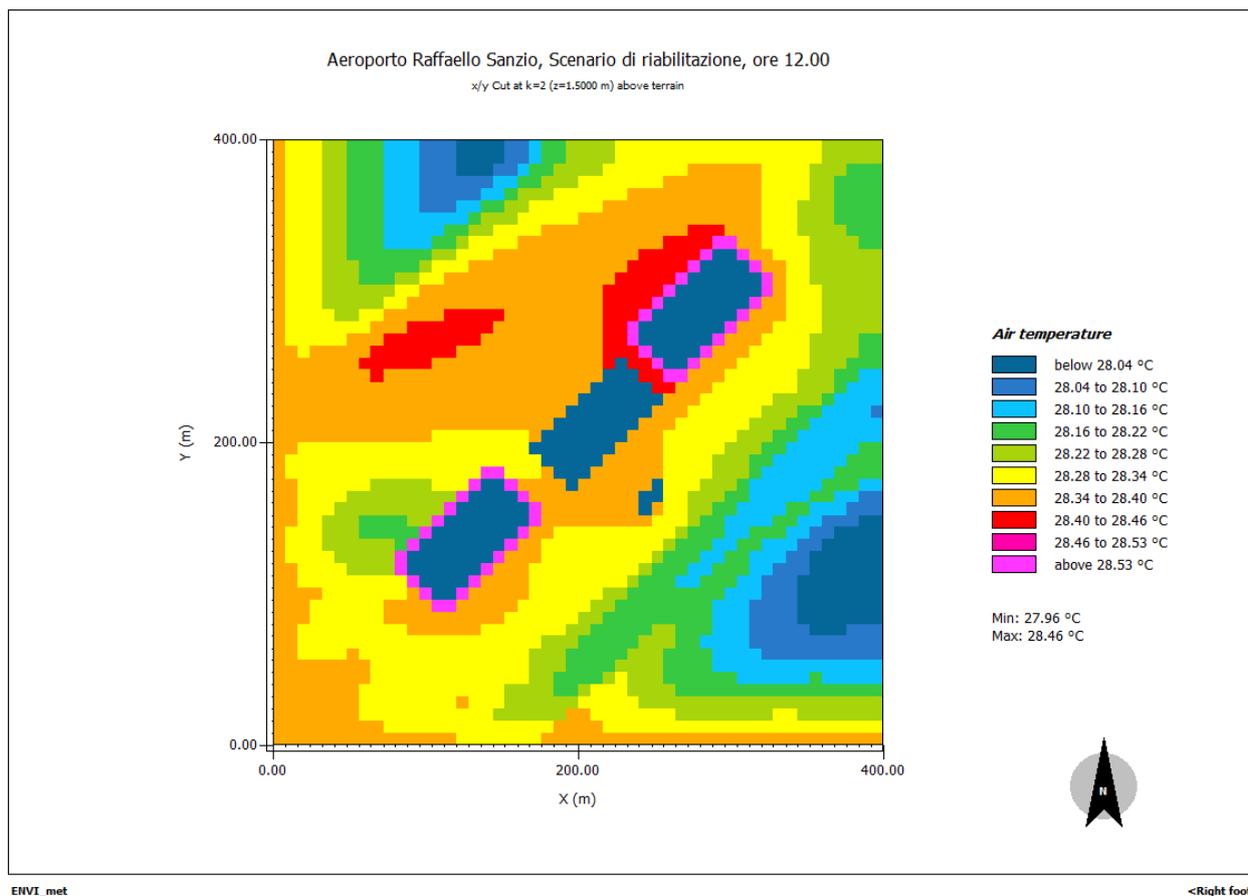


Fig. 72 Aeroporto Raffaello Sanzio, scenario di riabilitazione, ore 12, TEMPERATURA DELL'ARIA

La tavola presenta una sezione visibile, alla quota di 1.5 m dal terreno e alle ore 12, della temperatura dell'aria relativa lo scenario di riabilitazione dell'aeroporto Raffaello Sanzio. La simulazione fornisce rispettivamente la minima e la massima (da 27.96°C a 28.46°C) temperatura dell'aria riguardante l'intera area, facendo di fatto notare una diminuzione della massima di 0.15 °C rispetto lo stato dell'arte. Inoltre, dalla legenda si nota come le porzioni interessate dalla pavimentazione fredda, ovvero strade e parcheggi, siano più fredde, cambiando di fatto le proprie tonalità rispettivamente dal viola all'arancione e dal rosso al giallo rispetto allo stato dell'arte.

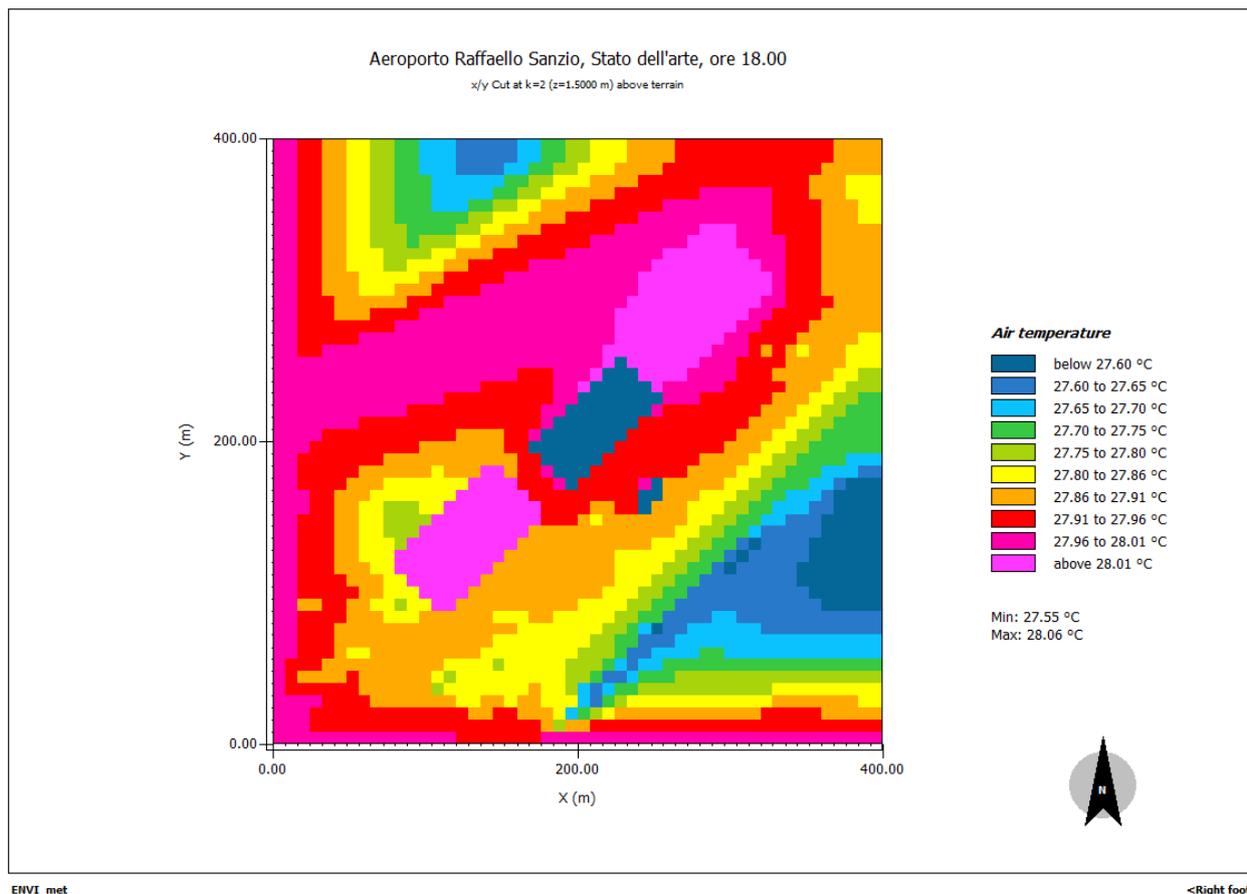


Fig. 73 Aeroporto Raffaello Sanzio, stato dell'arte, ore 18, TEMPERATURA DELL'ARIA

La tavola presenta una sezione visibile, alla quota di 1.5 m dal terreno e alle ore 18, della temperatura dell'aria relativa lo stato dell'arte dell'aeroporto Raffaello Sanzio. La simulazione fornisce rispettivamente la minima e la massima (da 27.55°C a 28.06°C) temperatura dell'aria riguardante l'intera area. Dalla legenda si nota come le porzioni interessate dal conglomerato bituminoso convenzionale, strade e parcheggi, tocchino le tonalità dall'arancione al rosso, mentre il terminal presenta la tonalità del viola, andando di fatto a costituire la porzione più calda della mappa.

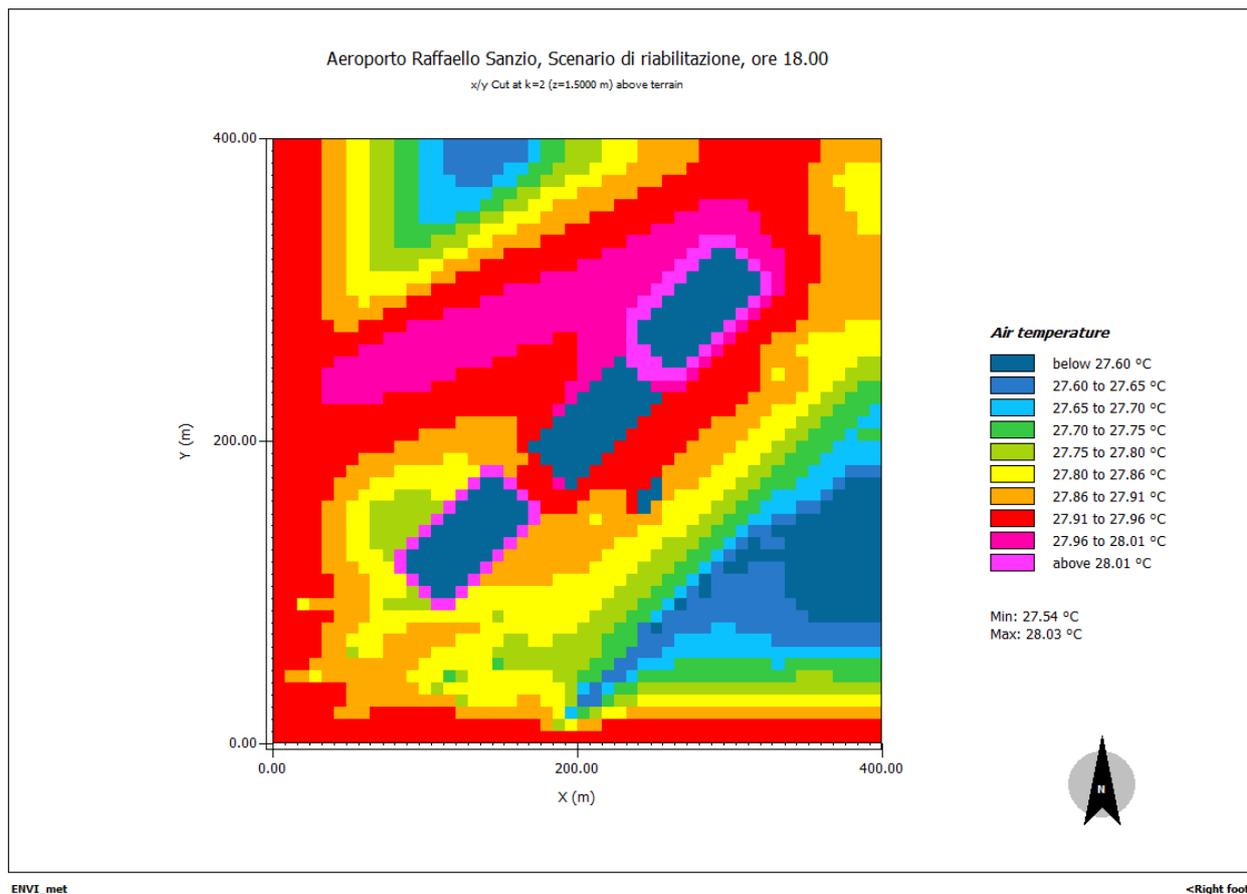


Fig. 74 Aeroporto Raffaello Sanzio, scenario di riabilitazione, ore 18, TEMPERATURA DELL'ARIA

La tavola presenta una sezione visibile, alla quota di 1.5 m dal terreno e alle ore 18, della temperatura dell'aria relativa lo scenario di riabilitazione dell'aeroporto Raffaello Sanzio. La simulazione fornisce rispettivamente la minima e la massima (da 27.54°C a 28.03°C) temperatura dell'aria riguardante l'intera area, misurando di fatto una variazione minima con lo stato dell'arte ma del tutto compatibile con la realtà per via dell'orario. Inoltre, dalla legenda si nota come le porzioni del terminal interessate dalla vernice bianca, siano più fredde, cambiando di fatto le proprie tonalità dal viola al blu rispetto allo stato dell'arte.

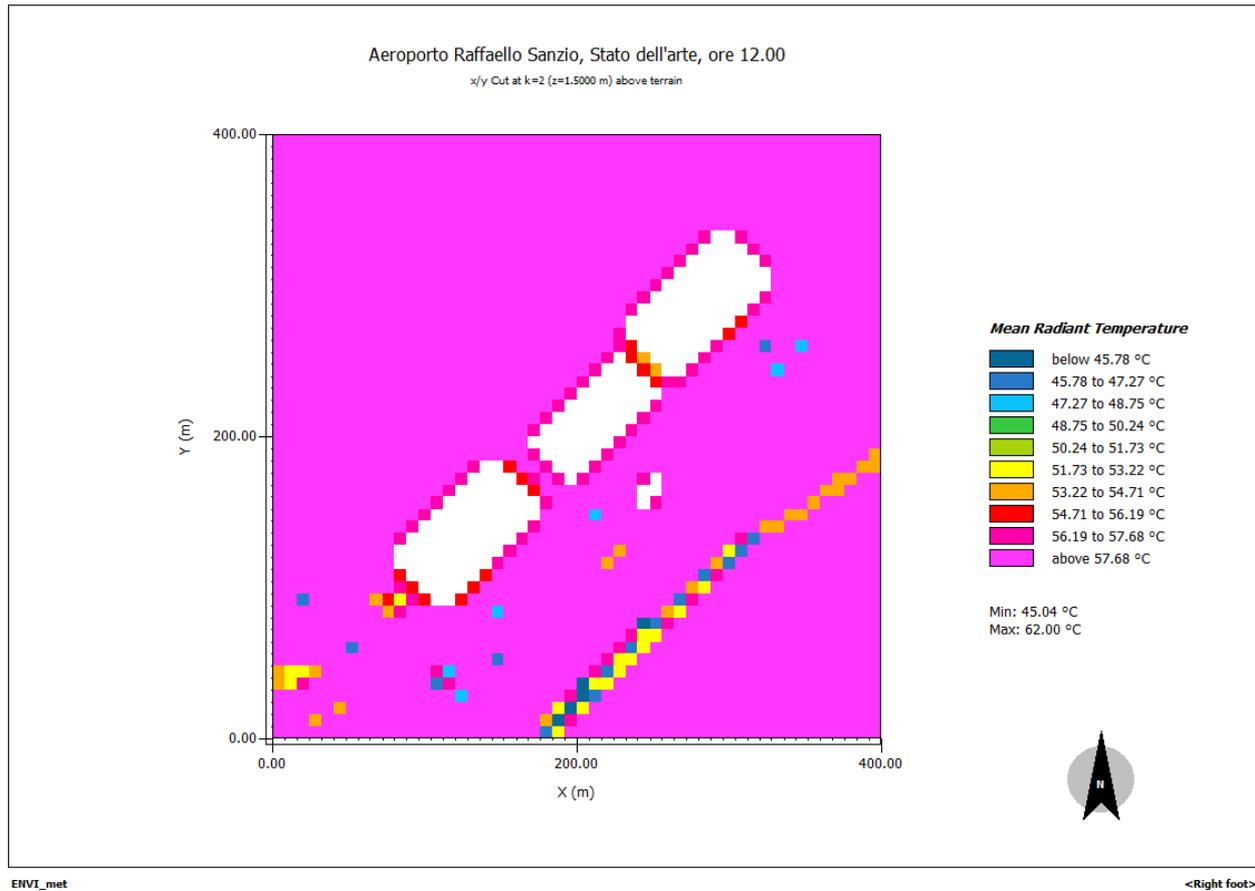


Fig. 75 Aeroporto Raffaello Sanzio, stato dell'arte, ore 12, TEMPERATURA MEDIA RADIANTE

La tavola presenta una sezione visibile, alla quota di 1.5 m dal terreno e alle ore 12, della temperatura media radiante relativa lo stato dell'arte dell'aeroporto Raffaello Sanzio. La simulazione fornisce rispettivamente la minima e la massima (da 45.04°C a 62.00°C) temperatura media radiante riguardante l'intera area. Dalla legenda si nota come la mappa nella sua totalità tocchi le tonalità del viola.

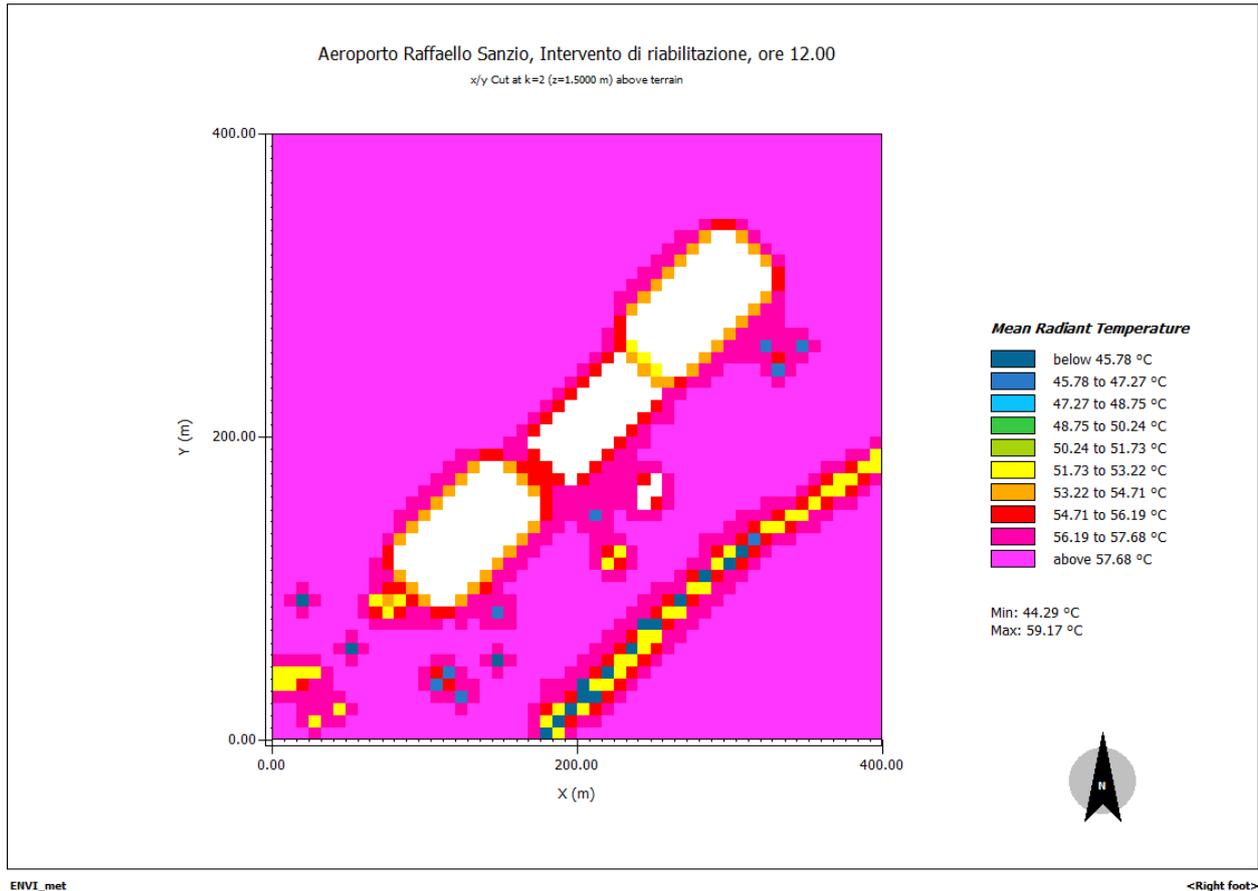


Fig. 76 Aeroporto Raffaello Sanzio, scenario di riabilitazione, ore 12, TEMPERATURA MEDIA RADIANTE

La tavola presenta una sezione visibile, alla quota di 1.5 m dal terreno e alle ore 12, della temperatura media radiante relativa lo scenario di riabilitazione dell'aeroporto Raffaello Sanzio. La simulazione fornisce rispettivamente la minima e la massima (da 44.29°C a 59.17°C) temperatura media radiante riguardante l'intera area, facendo registrare una netta diminuzione di 3°C rispetto la massima dello stato dell'arte. Dalla legenda si nota come la mappa nelle aree prossime il terminal cambi le proprie tonalità scendendo di una classe di colore rispetto allo stato dell'arte.

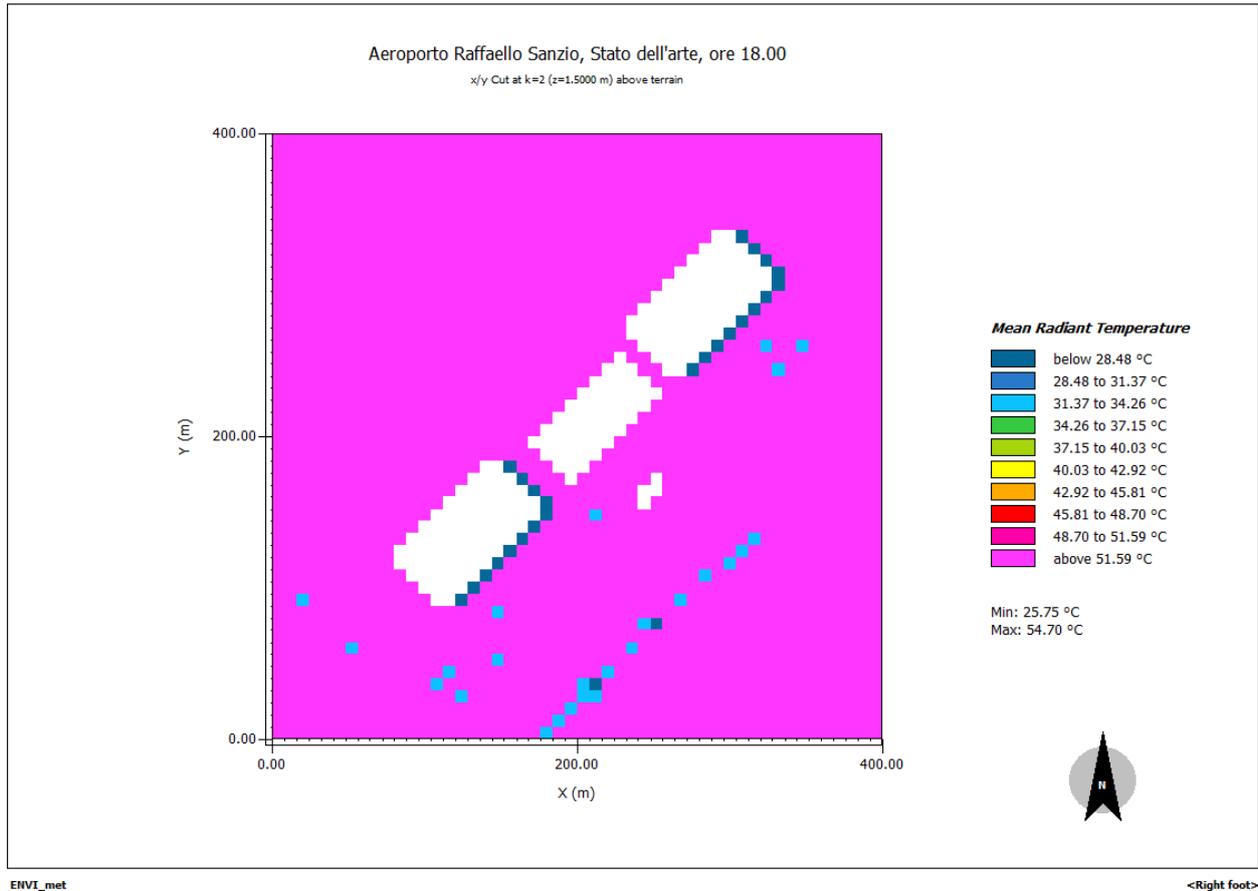


Fig. 77 Aeroporto Raffaello Sanzio, stato dell'arte, ore 18, TEMPERATURA MEDIA RADIANTE

La tavola presenta una sezione visibile, alla quota di 1.5 m dal terreno e alle ore 18, della temperatura media radiante relativa lo stato dell'arte dell'aeroporto Raffaello Sanzio. La simulazione fornisce rispettivamente la minima e la massima (da 25.75°C a 54.70°C) temperatura media radiante riguardante l'intera area. Dalla legenda si nota come la mappa nella sua totalità tocchi le tonalità del viola.

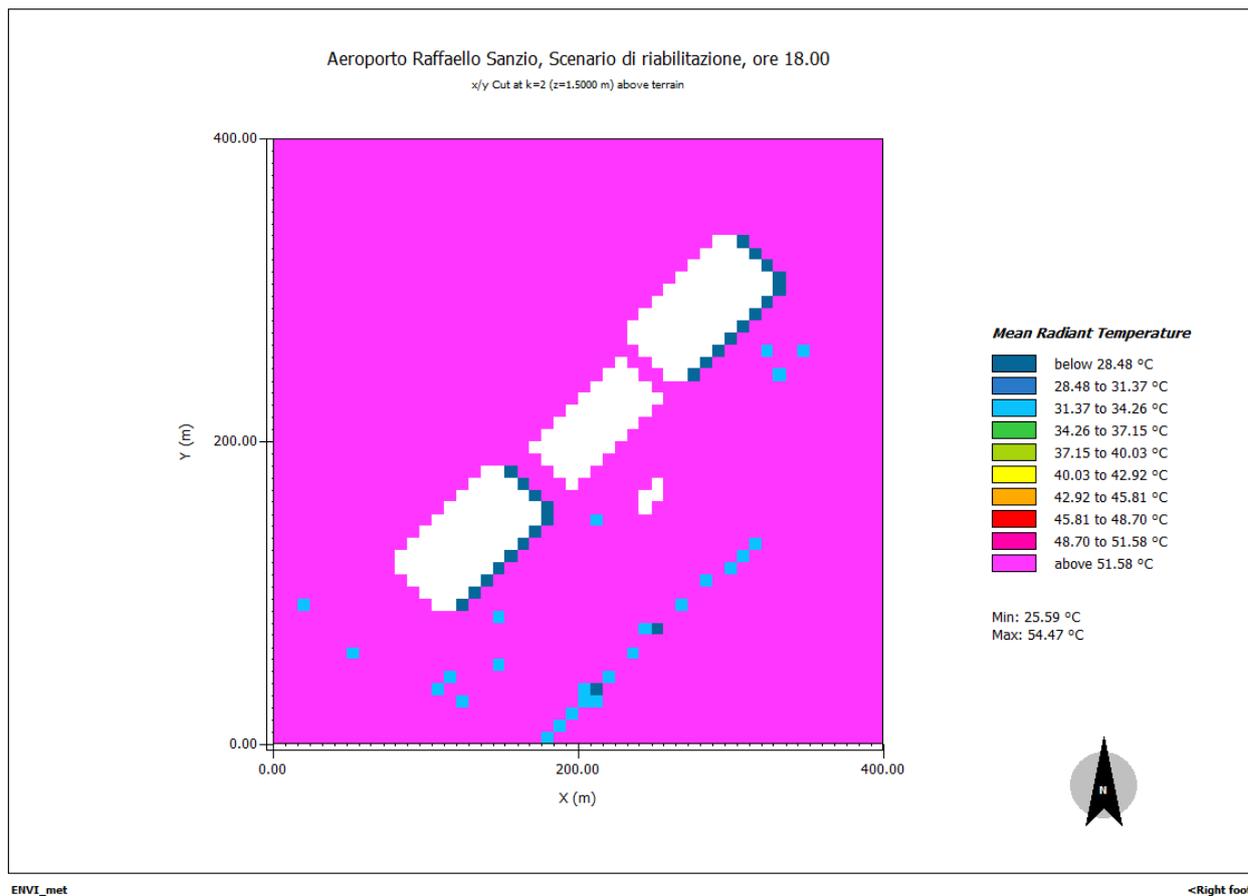


Fig. 78 Aeroporto Raffaello Sanzio, scenario di riabilitazione, ore 18, TEMPERATURA MEDIA RADIANTE

La tavola presenta una sezione visibile, alla quota di 1.5 m dal terreno e alle ore 18, della temperatura media radiante relativa lo scenario di riabilitazione dell'aeroporto Raffaello Sanzio. La simulazione fornisce rispettivamente la minima e la massima (da 25.59°C a 54.47°C) temperatura media radiante riguardante l'intera area, facendo registrare una variazione minima rispetto lo stato dell'arte ma compatibile per l'orario della giornata. Dalla legenda si nota come la mappa nella sua totalità tocchi le tonalità del viola.

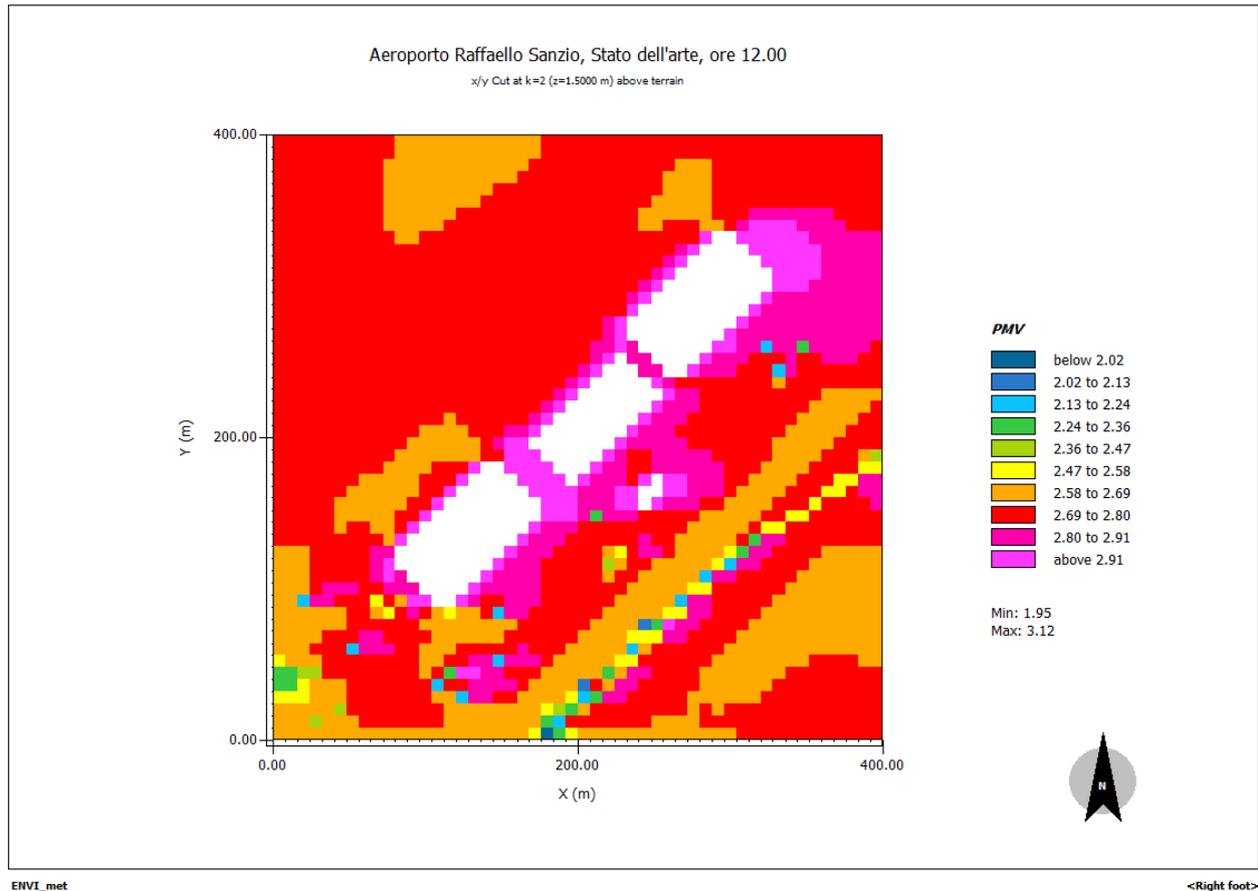


Fig. 79 Aeroporto Raffaello Sanzio, stato dell'arte, ore 12, PMV

La tavola presenta una sezione visibile, alla quota di 1.5 m dal terreno e alle ore 12, del PMV relativa lo stato dell'arte dell'aeroporto Raffaello Sanzio. La simulazione fornisce rispettivamente il valore minimo e massimo (da 1.95 a 3.12) riguardante l'intera area. Dalla legenda si nota come le porzioni interessate dal conglomerato bituminoso convenzionale, strade e parcheggi, abbiano PMV da 2.60 a 2.90, risultando di fatto molto calde per l'uomo.

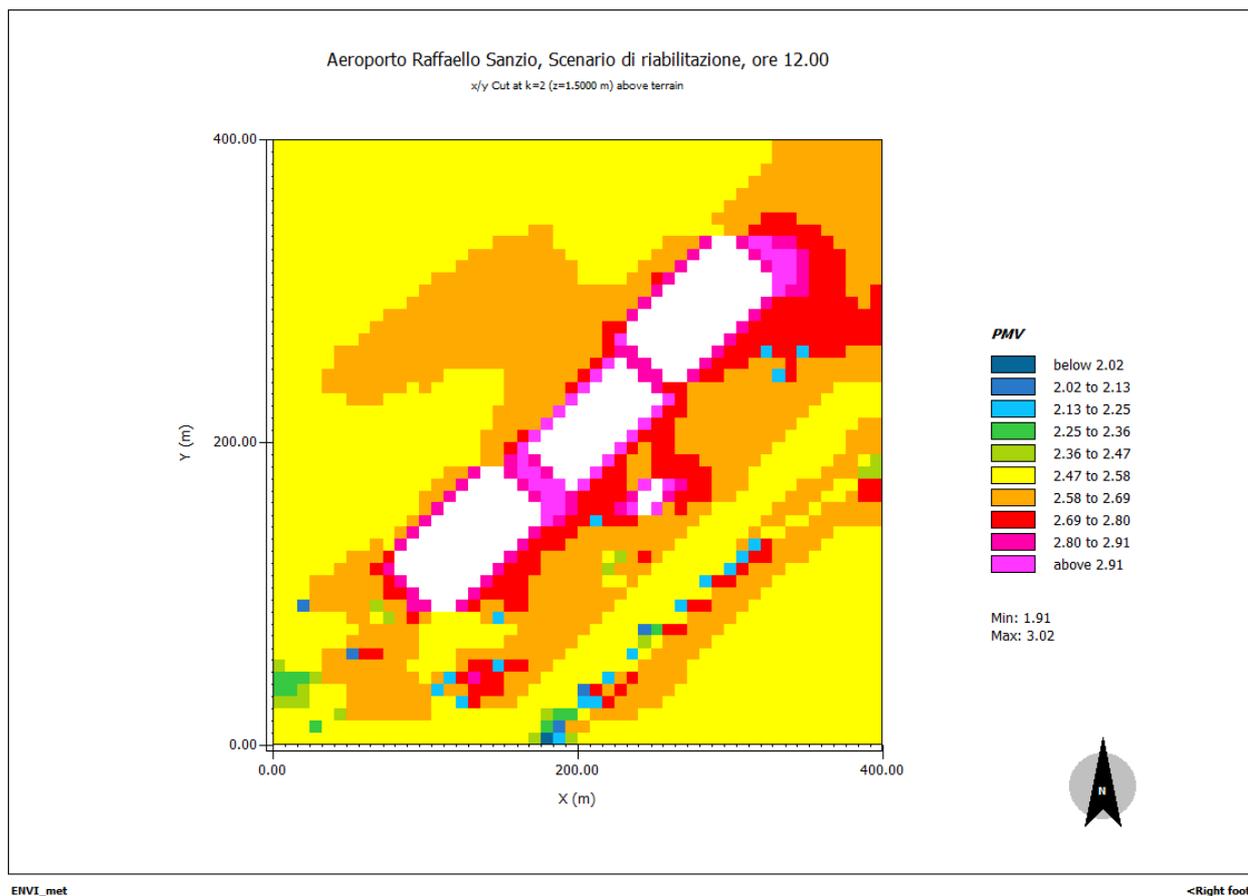


Fig. 80 Aeroporto Raffaello Sanzio, scenario di riabilitazione, ore 12, PMV

La tavola presenta una sezione visibile, alla quota di 1.5 m dal terreno e alle ore 12, del PMV relativa lo scenario di riabilitazione dell'aeroporto Raffaello Sanzio. La simulazione fornisce rispettivamente il valore minimo e massimo (da 1.91 a 3.02) riguardante l'intera area. Dalla legenda si nota come non solo le porzioni interessate dalla pavimentazione fredda, ovvero strade e parcheggi, ma anche il resto dell'area, abbiano ridotto di una scala di colore il valore di PMV, risultando di fatto migliori rispetto lo stato dell'arte, ma comunque calde per l'uomo.

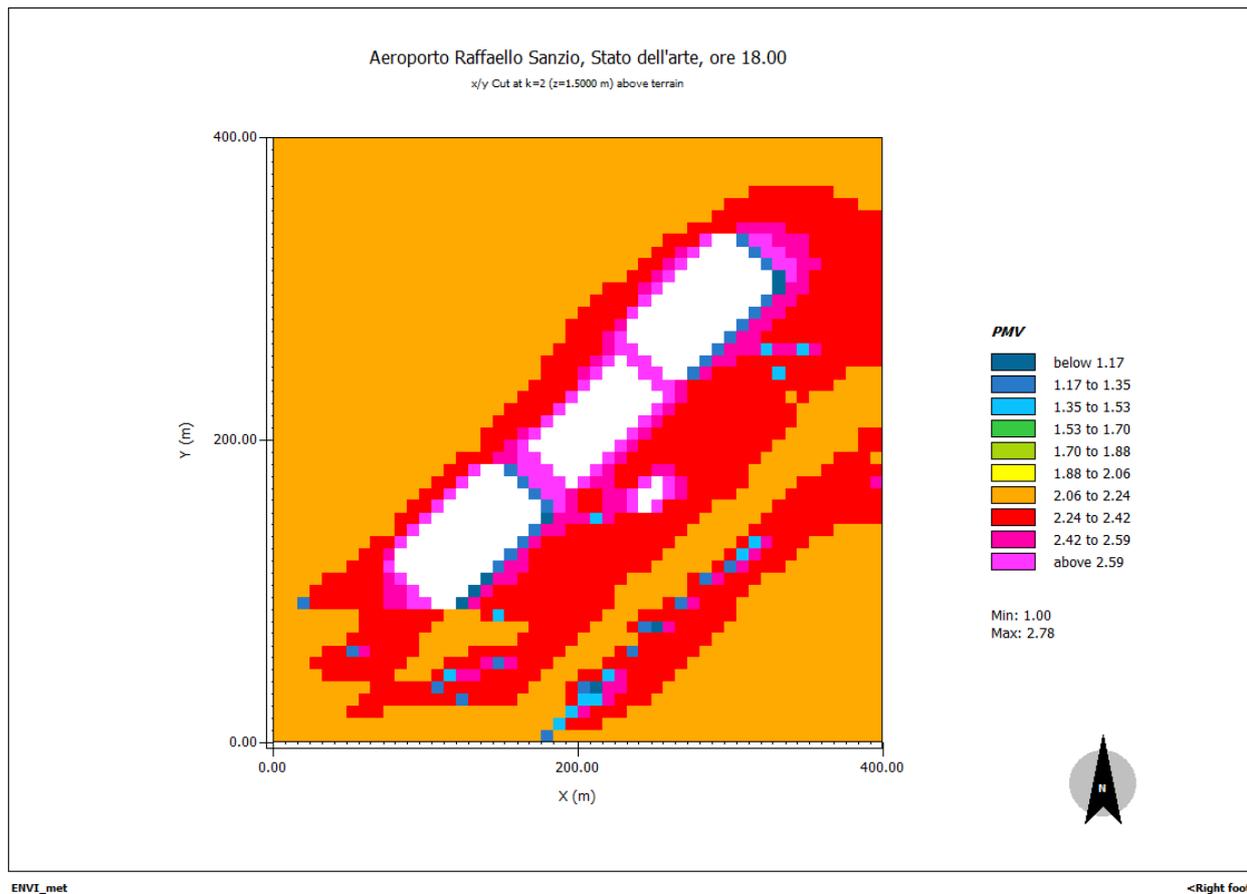


Fig. 81 Aeroporto Raffaello Sanzio, stato dell'arte, ore 18, PMV

La tavola presenta una sezione visibile, alla quota di 1.5 m dal terreno e alle ore 18, del PMV relativa lo stato dell'arte dell'aeroporto Raffaello Sanzio. La simulazione fornisce rispettivamente il valore minimo e massimo (da 1 a 2.78) riguardante l'intera area. Dalla legenda si nota come le porzioni interessate dal conglomerato bituminoso convenzionale, strade e parcheggi, abbiano PMV da 2.20 a 2.59, risultando di fatto calde per l'uomo.

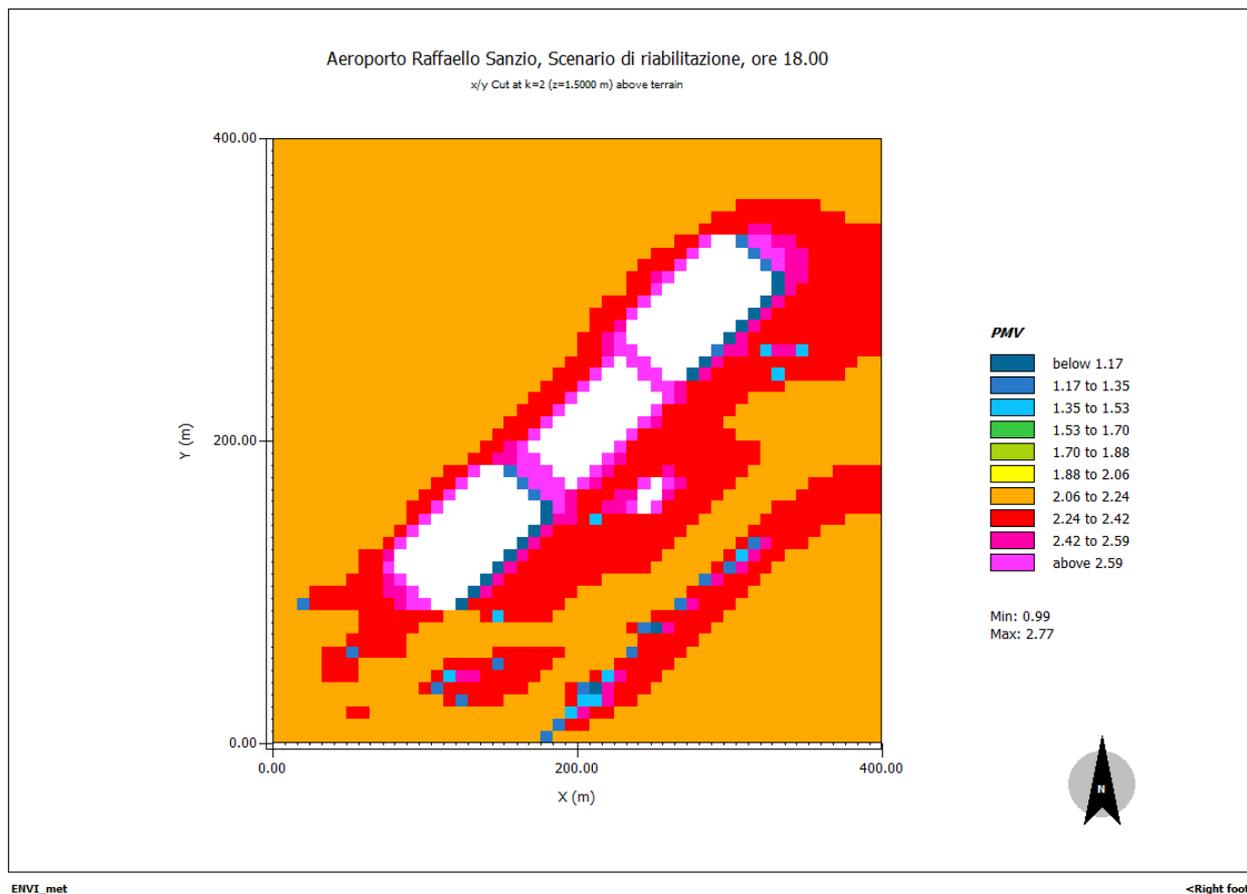


Fig. 82 Aeroporto Raffaello Sanzio, scenario di riabilitazione, ore 18, PMV

La tavola presenta una sezione visibile, alla quota di 1.5 m dal terreno e alle ore 18, del PMV relativa lo scenario di riabilitazione dell'aeroporto Raffaello Sanzio. La simulazione fornisce rispettivamente il valore minimo e massimo (da 0.99 a 2.77) riguardante l'intera area. Dalla legenda si nota come le porzioni interessate dalla pavimentazione fredda, ovvero strade e parcheggi, abbiano in parte ridotto di una scala di colore il valore di PMV, risultando di fatto migliori rispetto lo stato dell'arte, ma comunque calde per l'uomo.

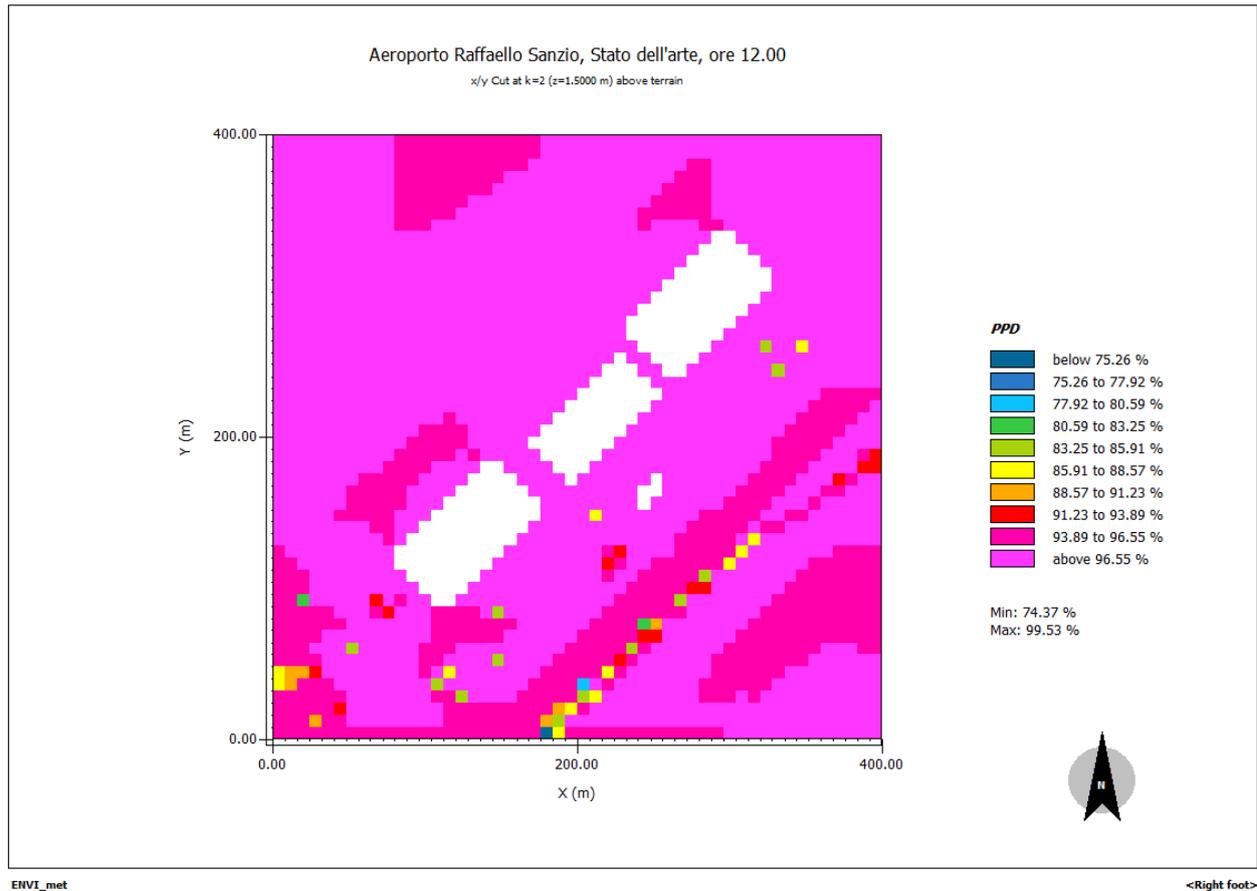


Fig. 83 Aeroporto Raffaello Sanzio, stato dell'arte, ore 12, PPD

La tavola presenta una sezione visibile, alla quota di 1.5 m dal terreno e alle ore 12, del PPD relativa lo stato dell'arte dell'aeroporto Raffaello Sanzio. La simulazione fornisce rispettivamente il valore minimo e massimo (da 74.37% a 99.53%) riguardante l'intera area. Dalla legenda si nota come le porzioni interessate dal conglomerato bituminoso convenzionale, strade e parcheggi, abbiano una percentuale di insoddisfatti superiore al 90%.

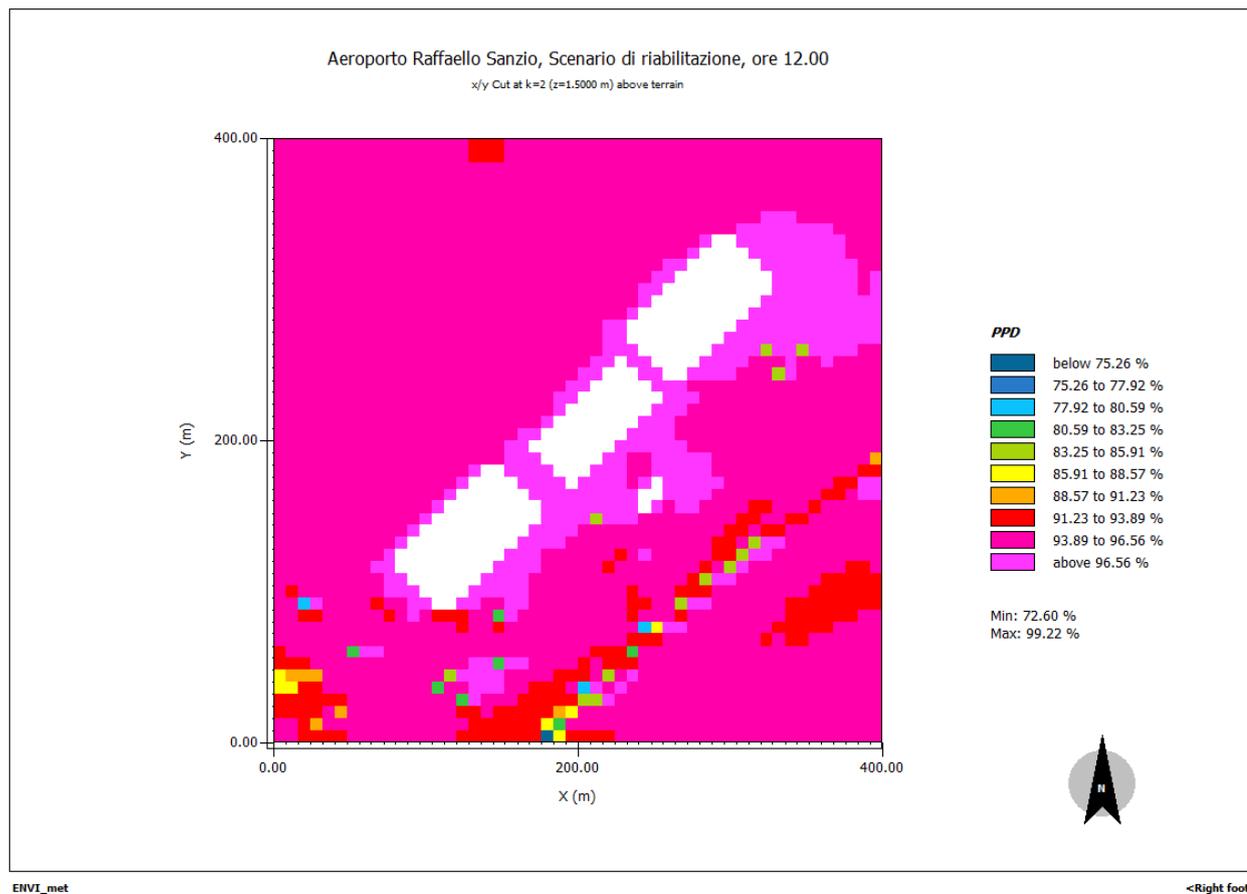


Fig. 84 Aeroporto Raffaello Sanzio, scenario di riabilitazione, ore 12, PPD

La tavola presenta una sezione visibile, alla quota di 1.5 m dal terreno e alle ore 12, del PPD relativa lo scenario di riabilitazione dell'aeroporto Raffaello Sanzio. La simulazione fornisce rispettivamente il valore minimo e massimo (da 72.60% a 99.22%) riguardante l'intera area. Dalla legenda si nota come le porzioni interessate dalla pavimentazione fredda, ovvero strade e parcheggi, abbiano ridotto di una scala di colore il valore di PPD, si è passato infatti ad una percentuale di insoddisfatti di circa il 94%, risultando di fatto migliori rispetto lo stato dell'arte, ma comunque calde per l'uomo.

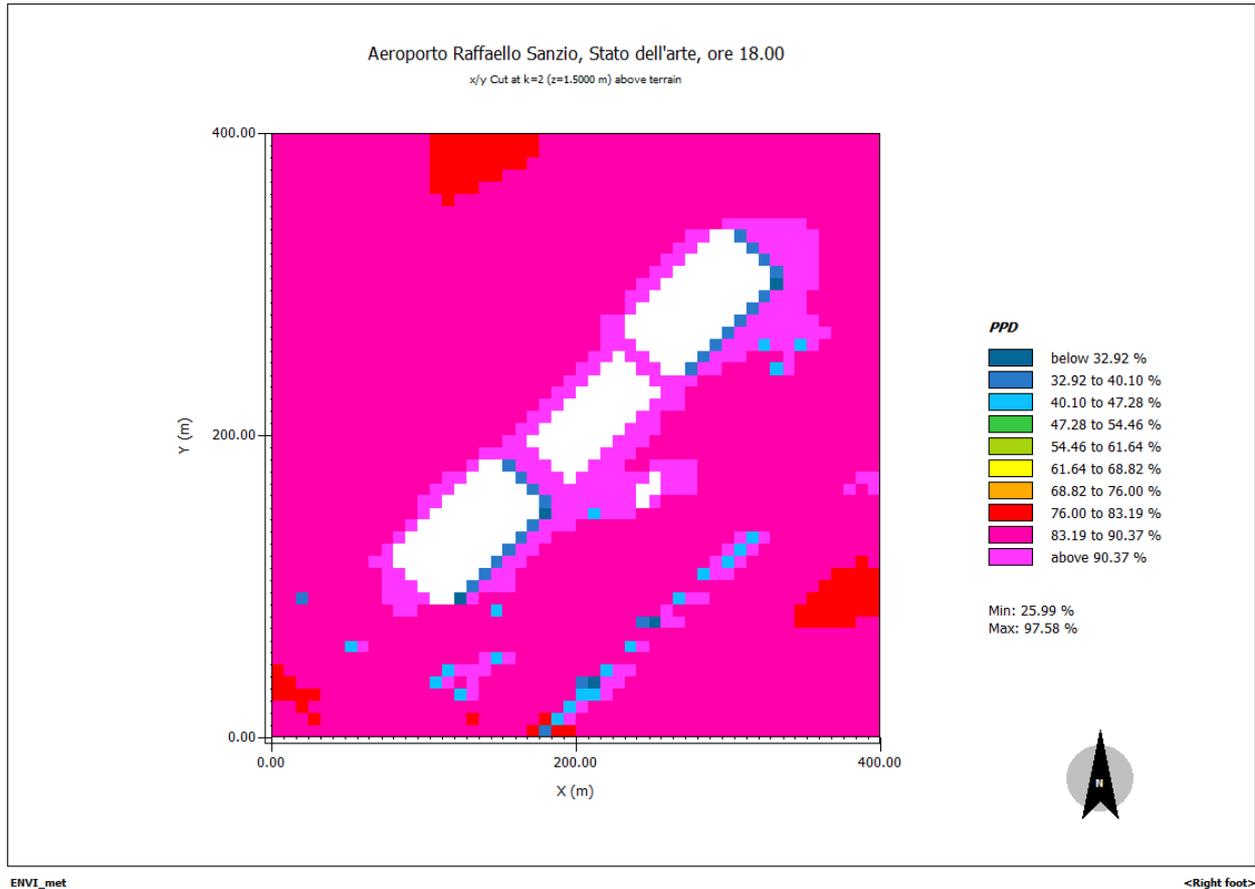


Fig. 85 Aeroporto Raffaello Sanzio, stato dell'arte, ore 18, PPD

La tavola presenta una sezione visibile, alla quota di 1.5 m dal terreno e alle ore 18, del PPD relativa lo stato dell'arte dell'aeroporto Raffaello Sanzio. La simulazione fornisce rispettivamente il valore minimo e massimo (da 25.99% a 97.58%) riguardante l'intera area. Dalla legenda si nota come le porzioni interessate dal conglomerato bituminoso convenzionale, strade e parcheggi, abbiano una percentuale di insoddisfatti superiori al 90%.

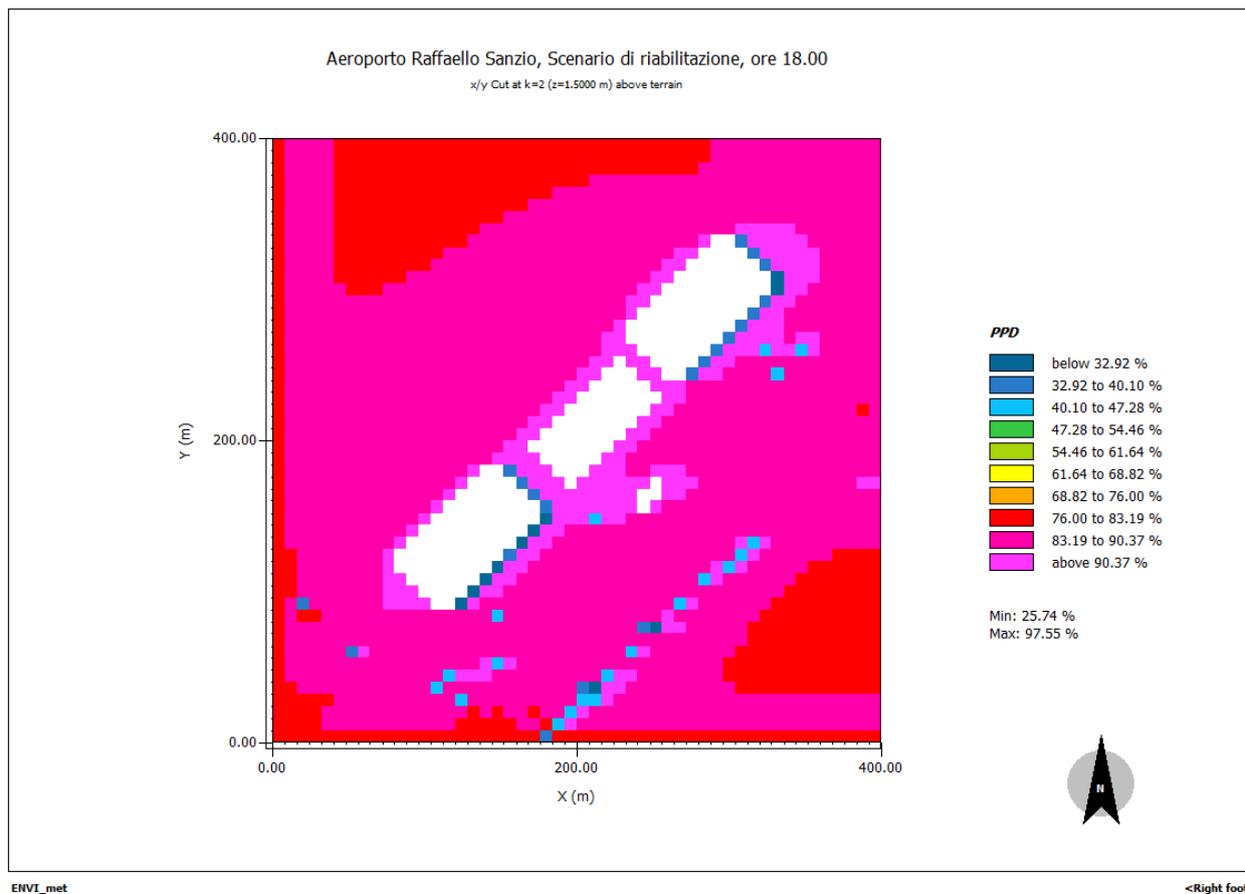


Fig. 86 Aeroporto Raffaello Sanzio, scenario di riabilitazione, ore 18, PPD

La tavola presenta una sezione visibile, alla quota di 1.5 m dal terreno e alle ore 18, del PPD relativa lo scenario di riabilitazione dell'aeroporto Raffaello Sanzio. La simulazione fornisce rispettivamente il valore minimo e massimo (da 25.74% a 97.55%) riguardante l'intera area. Dalla legenda si nota come le porzioni interessate dalla pavimentazione fredda, ovvero strade e parcheggi, abbiamo un PPD leggermente inferiore rispetto lo stato dell'arte, presentando solo un ridotto miglioramento se vediamo all'intera area oggetto dello studio, ma di fatto un ambiente caldo per l'uomo.

6 CONCLUSIONI

L'effetto isola di calore urbana è un fenomeno che affligge ormai in maniera sempre più persistente i centri abitati. Con questa tesi di laurea sono stati trattati gli aspetti generali relativi l'UHI, le tipologie, le cause, le tecniche di mitigazione e l'utilizzo di un modello di calcolo al fine di indagare le potenzialità dell'applicazione di un intervento di mitigazione in un tessuto urbano, rispettivamente il porto di Ancona e l'aeroporto Raffaello Sanzio.

È stata condotta un'analisi numerica con ENVI-met, un software che utilizza un metodo di calcolo deterministico. L'obiettivo della tesi è stato quello di verificare se l'uso di materiali ad elevata riflettività su larga scala fosse in grado di mitigare l'effetto isola di calore urbana, portando a miglioramenti in termini di benessere igrometrico. A lavoro ultimato si può affermare che per quanto riguarda la distribuzione della temperatura ambiente, nell'area portuale, l'applicazione di una pavimentazione fredda riflettente può ridurre notevolmente la temperatura dell'aria locale. Il calo medio della temperatura ambiente è vicino 1.5°C rispetto allo stato dell'arte (che presenta una pavimentazione in conglomerato bituminoso convenzionale), alla quota di 1.5 m di altezza e nelle ore centrali di una giornata molto calda, tipica estiva. Diversa la situazione dell'aeroporto Raffaello Sanzio che presenta sì delle diminuzioni di temperatura, ma di piccola entità. Sono stati riscontrati solo leggeri miglioramenti dal punto di vista del benessere termoigrometrico. Da notare però come il solo uso della vernice bianca sui tetti del terminal per l'area dell'aeroporto Raffaello Sanzio abbia portato ad un abbassamento di 0.5°C nelle zone limitrofe. È indiscutibile come le differenze fra lo stato dell'arte e lo scenario di riabilitazione siano esclusivamente merito dell'uso di materiali ad alto albedo, così come risulta evidente che l'utilizzo degli stessi in larga scala possa portare a miglioramenti significativamente più ampi. In conclusione, i benefici maggiori hanno riguardato l'area portuale, indice di un intervento riabilitativo relativo una porzione maggiore di spazio, rispetto all'intervento aeroportuale, dove la riabilitazione ha interessato il solo parcheggio e i tetti del terminal.

Bibliografia

- Akbari. 2008.** The effects of increasing surface reflectivity on heat - related mortality in Greater Montreal Area. Canada : s.n., 2008.
- al., Huttner et. 2012.** Heat island potential for three urban materials. 2012.
- Ali-Toudert F., Emmanuel R., Fernando H.J.S. 2005,2007.** 2005,2007, p. 241-25.
- Arnfield. 2003.** Two decades of urban climate research: a review of turbulence, exchanges of energy and water, and the urban heat island. 2003.
- ASHRAE. 2009.** *Handbook Fundamentals*. 2009, p. 186.
- **2009.** *Handbook Fundamentals*. 2009, p. 179.
- Bretz, Berdahl &. 1997.** *Preliminary survey of the solar reflectance of cool roofing materials*. 1997.
- Cole, Bell. 2008.** 2008.
- Gennaio, 2012.** *Cool Roofs Toolkit, A Practical Guide to Cool Roofs and Cool Pavements*. Gennaio, 2012.
- Duhme, Pauleit. 2000.** Assessing the environmental performance of land cover types for urban planning. *Landscape and Urban Planning*. 2000.
- EPA. Ottobre 2008.** *Reducing Urban Heat Islands: Compendium of Strategies*. s.l. : Washington DC: Environmental Protection Agency, Ottobre 2008.
- **1999.** *Storm Water Technology Fact Sheet: Porous Pavement*. s.l. : Environmental Protection Agency, 1999.
- Ferguson. 2008.** *Reducing Urban Heat Islands: Compendium of Strategies - Cool Pavements*. 2008.
- Gartland. Maggio 2001.** *Cool Alternative Paving Materials & Techniques*. s.l. : Clean Air Counts, Maggio 2001.
- Gauff. Maggio 2012.** *Tire Management: Rubberized Asphalt Concrete (RAC)*. s.l. : California Department of Resources Recycling and Recovery (CalRecycle), Maggio 2012.
- H.Potentials of Urban Heat Island Mitigation.* **Akbari. 2005.** Santorini, Greece : s.n., 2005. Passive and Low Energy Cooling 11 for the Built Environment. p. 11-22.
- Huttner, Bruse. 2009.** Numerical Modeling of the Urban Climate - A preview on ENVI-met 4.0. Yokohama, Japan : The seventh International Conference on Urban Climate, 2009.
- J.F., Humphreys M.A. et Nicol.** Climate change and Canada's north coast: research trends, progress, and future directions.

Keith, Oleson. 2010. *Effects of white roofs on urban temperature in a global climate model.* 2010.

Kinouchi. 2004. *Development of Cool Pavement with Dark Colored High Albedo Coating.* Tsukuba, Ibaraki, Japan : Public Works Research Institute, 2004.

Kyriakodis, G-E. 2017. *Using reflectine pavements to mitigate urban heat island in warm climates - Results from a large scale urban mitigatin project.* 2017.

Levine. 2011. *Cool Pavements Research and Technology.* Berkeley : Institute of Transportation Studies Library , 2011.

Levinson. 2001. *Effects of Composition and Exposure on the Solar Reflectance of Portland Cement Concrete.* s.l. : Publication No.LBNL-48334, Lawrence Berkeley National Laboratory, 2001.

M., Lazzarin Renato. 2011. Le isole di calore nelle aree urbane. 2011, p. 34-40.

NAPA. Porous Pavements. s.l. : National Asphalt Pavement Association.
NORMA ISO 7730.

Oke. 1997. *Urban Climates and Global Environmental Change.* 1997.

— . **1992.** *Urban heat island and wind characteristics.* 1992.

Oke, Voogt &. 2003. *Thermal Remote Sensing of Urban Climates.* 2003.

On the Use of Cool Materials as a Heat Island Mitigation Strategy. **Santamouris. 2007-2008.** 2007-2008, *Journal of Applied Meteorology and Climatology.*

Pauleit. *Adapting Cities for Climate Change: The Role of the Green Infrastructure.* 2007 : s.n.

Reing, Gomez, Gaj. 1998. *Vegetation and climatic changes in a city.* 1998.

Rizwan. 2008. *Urban heat island and its effect on the cooling and heating demands in urban and suburban areas of Hong Kong.* s.l. : Theoretical and Aplpied Climatology, 2008.

Shen. 2008. *Temporal and spatial characteristics of the urban heat island during rapid urbanization in Shanghai.* China : s.n., 2008.

Synnefa. 2009. *Measurement of Optical Properties and Thermal Performance of Coloured Thin Layer Asphalt Samples and Evaluation of Their Impact on the Urban Environment.* s.l. : Second International Conference on Countermeasures to Urban Heat Islands, 2009.

Taha. 1997. *Urban climates and heat islands: albedo, evapotranspiration and anthropogenic heat.* *Energy and Buildings.* 1997, p. 99-103.

Tran. 2009. *Strategies for Design and Construction of High-Reflectance Asphalt Pavements.* Auburn, Alabama : National Center for Asphalt Technology, 2009.

World Urbanization Prospects, The 2014 Revision. **Nations, United.**

